

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як
навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 151
"Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", освітньо-
професійною програмою "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології кібер-енергетичних систем"*

**Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020**

Рецензент: *Галицька І.Є., доц., к.т.н., доцент*

Відповідальний
редактор: *Волощук В.А., д.т.н., в.о. зав. каф. АТЕП ТЕФ*

*Гриф надано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
(протокол № 10 від 18.06.2020 р.) за поданням Вченої ради факультету
(протокол № 10 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Технічні засоби автоматизації [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”, освітньо-професійна програма “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем” / Укладач: І.М. Голінко, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –63 с.

Посібник призначений для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп’ютерно інтегровані технології”, освітньо-професійна програма “Автоматизація та комп’ютерно інтегровані технології кібер-енергетичних систем”, які вивчають курс “Технічні засоби автоматизації”.

Метою посібника “Технічні засоби автоматизації” є висвітлення основних принципів функціонування приладів та обладнання для систем автоматизації, опанування класифікації приладів, їх основних технічних характеристик, основних методів інтегрування технічних засобів автоматизації у контури вимірювання та регулювання, отримання практичних навичок роботи та конфігурації приладів для автоматизації технологічних процесів.

© І.М. Голінко, 2020
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

Зміст

Введення	4
Лабораторна робота №1. Програмно-технічний комплекс S7000.....	5
Контрольні запитання до лабораторної роботи №1	13
Лабораторна робота №2. Визначення властивостей виконуючого механізму.....	14
Контрольні запитання до лабораторної роботи №2	23
Лабораторна робота №3. Дослідження динамічних властивостей цифрового регулятора з широтно-імпульсною модуляцією.....	24
Контрольні запитання до лабораторної роботи №3	35
Лабораторна робота №4. Ідентифікація динамічних властивостей електричної печі	37
Контрольні запитання до лабораторної роботи №4	49
Лабораторна робота №5. Параметричне налаштування регулятора інженерними методами розрахунку	51
Контрольні запитання до лабораторної роботи №5	59
Література	61

Введення

Автоматизація технологічних процесів – вирішальний фактор в питаннях підвищення продуктивності праці та якості продуктів виробництва. Якість роботи будь-якої автоматичної системи керування (АСК) залежить від того, наскільки добре вона спроектована, змонтована, налагоджена та за яких умов експлуатується. В автоматизованому виробництві стабілізується технологічний процес, підвищується ритмічність виготовлення кінцевого продукту та зменшується вплив на процес виробництва суб'єктивних факторів. Автоматизація сучасного виробництва передбачає високі вимоги до кваліфікації робочого персоналу.

Технічні засоби автоматизації на базі комп'ютерної техніки створюють умови для реалізації комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва, тому засвоєння основ автоматизації виробництва на базі програмно-технічних комплексів засобів автоматизації (ПТКЗА) є актуальним завданням підготовки кваліфікованих спеціалістів із автоматизації процесів керування.

У методичних вказівках з дисципліни «Технічні засоби автоматизації» розглядається ПТКЗА S7000 на прикладі автоматизації лабораторної печі. Дані методичні вказівки є продовження першого циклу лабораторних робіт. Тут детально описується цифрова система керування температурним режимом лабораторної печі. Розглянута програмна реалізація цифрового ПІД-регулятора із широтно-імпульсним керуванням. Представлено інженерні методи ідентифікації та налаштування цифрової системи керування. Виконавши другий цикл лабораторних робіт, студенти опанують і практично засвоять методику налаштування та дослідження цифрової системи керування на прикладі лабораторної печі, що є основою для створення комп'ютерно-інтегрованих виробництв.

Лабораторна робота №1

Програмно-технічний комплекс S7000

Мета роботи: ознайомитися із функціональними можливостями лабораторного стенду та засобів автоматизації серії S7000, придбати практичні навички роботи із пристроями стенду.

Теоретичні відомості

Універсальні модулі серії S7000 є функціонально закінченими пристроями, призначеними для побудови розподілених систем керування технологічними процесами. До складу програмно-технічного комплексу засобів автоматизації (ПТКЗА) входять модулі: аналогового, дискретного введення-виведення; модулі перетворювачів, повторювачів; керуючих контролерів; модулі живлення і т.д. Програмне забезпечення дозволяє легко конфігурувати і налагодити роботу системи керування будь-якої складності. Набір команд модулів S7000 сумісний із командами модулів: I-7000, ADAM-4000, NuDAM-6000.

Усі пристрої ПТКЗА S7000 випускаються в компактних пластикових корпусах із кріпленням на стандартні 35-мм профільні DIN-шини [1 - 4]. На верхній частині корпуса розташовані клеми для підключення датчиків і органів керування. На нижній частині корпуса розташовані клеми для підключення живлення, мережевого з'єднання, датчиків та органів керування. Комутаційний набір елементів залежить від типу конкретного модуля. У модулях серії S7000G передбачена гальванічна ізоляція 1000 В за інтерфейсом, швидкість обміну становить до 115 кбод, живлення +15В...+36В, робочий температурний діапазон -5...+50 °С. Для підвищеної надійності й запобігання “зависання” в модулях використовується подвійний сторожовий таймер (програмний та апаратний). Наявність двох сторожових пристроїв забезпечує збільшення надійності роботи всієї системи.

ПТКЗА S7000 використано в лабораторному стенді для реалізації системи автоматичного керування (САК) печі. В якості регулюючого пристрою використано програмно-комп'ютерний контролер (ПКК) S7386-50D та розподілений пристрій зв'язку із об'єктом (ПЗО) S7020 для вводу аналогової інформації. Спрощена схема лабораторного стенду представлена на рис. 1.1.

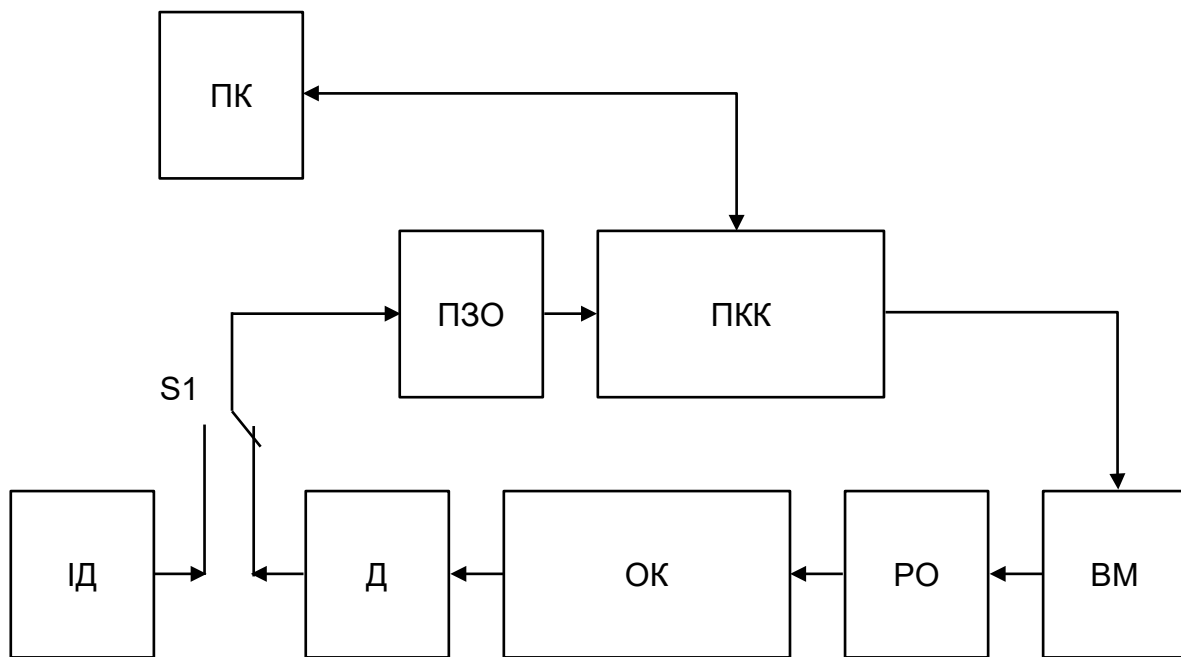


Рис. 1.1. Схема лабораторного стенду

На рис.1.1 прийнято такі позначення: ПК – персональний комп'ютер, ПЗО - пристрій зв'язку із об'єктом S7020, ПКК - програмно-комп'ютерний контролер S7386-50D, S1 – перемикач, ІД – імітатор датчика температури, Д – датчик температури, ОК – об'єкт керування (піч), РО – регулюючий орган, ВМ – виконуючий механізм.

Об'єктом керування (ОК) є електрична піч. Температура в робочому просторі печі вимірюється термометром опору (Д). Інформаційний сигнал від датчика температури через перемикач S1 надходить на ПЗО S7020.

Також за допомогою перемикача S1 до ПЗО можна підключити імітатор датчика температури (ІД). Модуль аналогового введення перетворює сигнал опору у цифровий код, який передається на ПКК S7386-50D за інтерфейсом RS-485. ПКК порівнює вимірний сигнал температури із запрограмованим значенням завдання та на основі цифрового ПІД-закону регулювання впливає на виконуючий механізм (ВМ), якщо помилка розбалансу більша за допустиму величину. В якості ВМ постійної швидкості застосовується електропривод BELIMO LM230A-SR [5]. ВМ впливає на шток регулюючого органу (РО). В якості РО у стенді використовується лабораторний автотрансформатор (ЛАТР). Кутове переміщення движка ЛАТРа приводить до зміни електричної потужності, що подається на нагрівальний елемент печі. В свою чергу, зміна потужності приводить до зміни регульованої температури печі.

Усі функції керування лабораторною піччю програмно реалізовані на контролері. Під час роботи, ПКК відображує інформацію про технологічні параметри печі на рідинно-кристалічному індикаторі (РКІ). Експлуатація РКІ проводиться в двох режимах:

- індикація параметрів системи;
- редагування уставок САК.

Переключення між режимами проводиться за допомогою 6-х кнопкової клавіатури, що розташована на зовнішній панелі ПКК. Функції кнопок мають наступне призначення:

Кнопки ◀, ▶ перемикають номер поточного списку для виводу. Натиснення кнопки ▶ збільшує номер поточного списку на 1, а натискання кнопки ◀ - зменшує на 1. Тобто, натискання кнопок ◀, ▶ прокручує списки зліва направо і в іншу сторону. Списки прокручуються по колу. При переході на новий список, виводиться перше повідомлення вибраного списку. Кнопки ▼, ▲ перемикають номер поточного повідомлення у

вибраному списку для виводу. Натиснення кнопки ▼ збільшує номер поточного повідомлення на 1, а натискання кнопки ▲ - зменшує на 1. Таким чином, натискання кнопок ▼, ▲ прокручує повідомлення зверху вниз і в інший бік. Повідомлення прокручуються по колу (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Призначення кнопок керування в режимах індикації та редагування

Кнопки Esc і Enter призначені для редагування значення обраної змінної. Натиснення Enter збільшує значення змінних типу Integer та Float на величину кроку зміни параметра (крок зміни визначається програмно), а натискання Esc- зменшує. Для змінних типу Boolean натискання на кнопку Esc або Enter інвертує значення змінної.

Контролер S7386-50D є вільно програмований, а тому списки повідомлень на РКІ і загалом весь алгоритм керування формується під час розробки програмного забезпечення для конкретного технологічного процесу. Як приклад, в таблиці 1.1 представлено декілька списків меню РКІ для автоматизації системи гарячого водопостачання (ГВП).

Таблиця 1.1. Технологічні параметри системи ГВП, що відображуються на РКІ

№ списку та назва	Повідомлення	Призначення параметра	Примітка
Список 1: ПКК S7386-50D ЛПА «Конис»	ДАТА XX ВРЕМЯ XX	Виведення поточної дати та часу	
	Производительность ПКК XX Цикл/сек	Кількість циклів що виконує контролер за секунду	
	Время работы XX	Час пройдений від моменту включення контролера	
	Количество перегрузок XX	Кількість рестартів контролера	
Список 2: Контроль параметров	Температура в ГВС Тгвс=XX	Температури у системі ГВП	
	Температура обратки Тобр=XX	Температура зворотної мережевої води	
	Положение ИМ L=XX	Положення клапану	
	ПИД dUp=XX Up=XX	Вихідні параметри ПІД – блоку	
	ШИМ Тим=XX Тор=XX Vtm=XX	Поточні параметри ШИМ управління: Тим – час імпульсу Тор – клапан вверх Vtm – клапан вниз	
	Перепад на насосах – X	Індикація присутності/відсутності перепаду тиску на насосах	
	Насос1 включен - X	Статус насоса 1	
	Насос2 включен - X	Статус насоса 2	
Список 3:	Режим АВТ/РУЧН – X	Режим роботи системи (автоматичний/ручний)	

Режим регулю- вання	ОС ИМ L =XX Клапан вверх - X	Зворотній зв'язок із ВМ (положення клапану), ручне управління клапаном вверх	
	ОС ИМ L =XX Клапан вниз - X	Зворотній зв'язок із ВМ (положення клапану), ручне управління клапаном вниз	
	Макс. время ИМ Tval=XX с/10	Час ходу ВМ	
	Мин. время имп. Tmin=XX с/10	Час мінімального імпульсу	
	Включить насос 1 - X	Ручне включення насосу 1	
	Включить насос 2 – X	Ручне включення насосу 2	
	Код авар.=X Сброс аварий=X	Індикація коду аварії та можливість ручного скидання коду аварії	

Інформація, що відображується на РКІ ПМК дублюється на персональному комп'ютері (ПК). ПМК та ПК об'єднані в єдину локальну мережу. SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition), що встановлена на ПК дає можливість вести диспетчерське керування піччю та фіксувати її параметри в реальному часі [6].

Для запуску SCADA-системи необхідно відкрити ярлик "Электрическая печь" на робочому столі. Під час запуску SCADA-системи відкривається вікно для авторизації користувача. Тут необхідно вибрати користувача системи "student" та натиснути Ок. Головне вікно SCADA-системи є мнемосхемою лабораторної установки із відображенням усіх контрольованих параметрів ПМК, рис. 1.3.

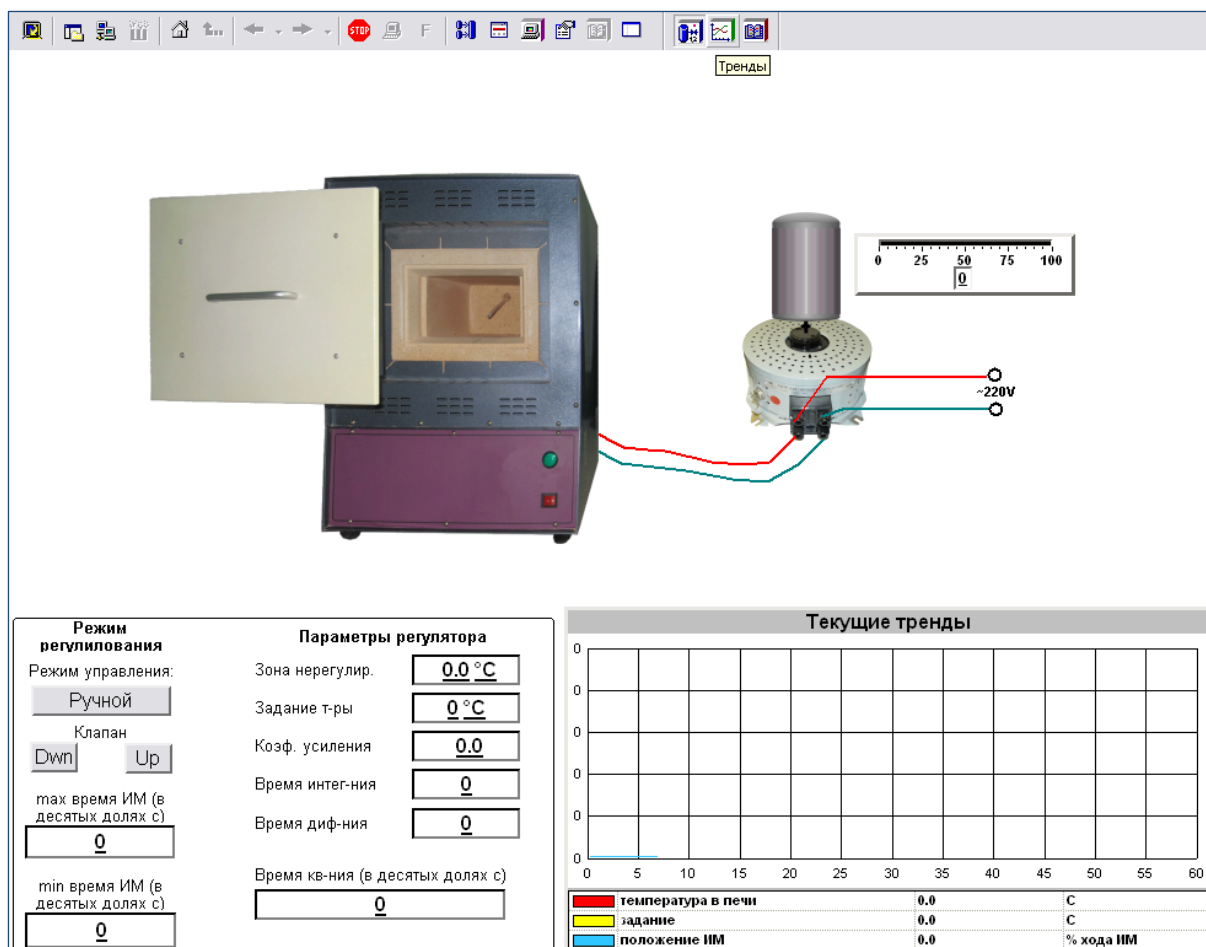


Рис. 1.3. Зображення головного вікна SCADA-системи

У головному вікні можна задати параметри контролера або перевести управління в ручний режим. У разі ручного режиму стають активними кнопки Клапан Dwn і Up. Також тут присутній блок поточних трендів, що дає можливість оцінити хід процесу нагрівання. Перегляд архівних трендів проходить у вікні «Тренды». Вікно активується, якщо натиснути кнопку «Тренды» на панелі інструментів у верхній частині екрану. У вікні «Тренды» користувач може експортувати перехідні процеси у вигляді *.csv таблиць для подальшої обробки. Щоб скористатися сервісом - необхідно натиснути кнопку "Экспорт" у верхній частині вікна трендів і зберегти дані у файл.

Хід роботи

1. Ознайомитися із схемою лабораторної установки та підготувати її до роботи.
2. Подати напругу на стенд.
3. Ознайомитися із меню ПКК S7386-50D, визначити призначення окремих списків та повідомлень меню. Зафіксувати списки меню контролера за прикладом, що наведений у таблиці 1.1.
4. Перевести перемикач S1 в положення імітації температури у печі. Змінюючи положення ІД отримати його статичну характеристику. Результати занести до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Статична характеристика імітатора датчика температури.

Положення ІД, %	0	25	50	75	100
Температура у печі, °C					

5. Ознайомитися із SCADA-системою ПК, визначити призначення її окремих елементів.
6. Перевести САК у ручний режим. Змінюючи положення ВМ у ручному режимі зняти тренди положення ВМ та температури у печі.

Обробка результатів

Заповнити таблиці за п.3, п.5. ходу роботи. За даними таблиці 1.2 побудувати статичну характеристику імітатора датчика температури.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити теоретичні відомості, таблиці за п.3, п.5. ходу роботи, графіки $T_{ID} = f(\varphi_{ID})$, $X_{BM}(t) = f(Up(t), Dwn(t))$, $T_{OK}(t) = f(X_{BM}(t))$, висновки.

Контрольні запитання до лабораторної роботи №1

1. Поясніть принцип роботи лабораторної установки.
2. Яким чином передається сигнал температури до ПКК S7386-50D?
3. Яким чином передається керуючий сигнал від ПКК S7386-50D до РО?
4. Яке призначення перемикача S1?
5. Яка структура і принцип роботи ПЗО S7020 або S7017?
6. Яка структура і принцип роботи ПКК S7386-50D?
7. Яким чином відбувається перемикання між автоматичним та ручним режимом роботи САК, в чому відмінність цих режимів?
8. Як влаштований ВМ постійної швидкості BELIMO LM230A-SR?
9. Пояснити призначення будь-якого елементу меню РКІ.
10. Яким чином відбувається навігація за списками меню РКІ?
11. Яким чином відбувається редагування параметрів на РКІ?
12. Призначення SCADA-системи.
13. Яким чином можна зберегти тренди контрольованих параметрів?
14. Як організувати ручний режим роботи контролера із ПК та змінити положення РО?

Лабораторна робота №2

Визначення властивостей виконуючого механізму

Мета роботи: ознайомитися із класифікацією виконуючих пристроїв, вивчити принцип роботи електромашинного виконуючого механізму та практично навчитися визначати його основні властивості, придбати практичні навички керування виконуючим механізмом в САК.

Теоретичні відомості

На сьогодні немає загальноприйнятої класифікації виконуючих пристроїв (ВП) [7]. Класифікацію можна вважати наближеною, проте вона дозволяє впорядкувати основні класифікаційні ознаки дросельно-регулюючої арматури. Класифікація ВП складена в залежності від енергії живлення та принципу дії виконуючих механізмів (ВМ), а також конструктивного виконання регулюючих органів (РО).

ВП в залежності від енергії живлення поділяють на види: пневматичні (із пневматичним ВМ); електричні (із електричним ВМ); гідравлічні (із гідравлічним ВМ); електропневматичні (пневматичний ВМ із електропневматичним перетворювачем); електрогідравлічні (гідравлічний ВМ із електрогідравлічним перетворювачем); пневмогідравлічні (гідравлічний ВМ із пневмогідравлічним перетворювачем).

В залежності від конструктивних особливостей РО виконуючих пристроїв поділяють на види: заслінкові; односідельні; двосідельні; триходові; шлангові; діафрагмові. Повна назва ВП складається на основі вказаної класифікації. Якщо пневматичний ВМ з'єднаний із заслінковим РО, то його комплексна назва – “пневматичний заслінковий виконуючий пристрій”.

Основними характеристиками РО є: умовний тиск в трубопроводі, допустима температура, витратна характеристика умовний діаметр, максимальний перепад тиску на РО.

Крім загальноновживаних для керування технологічними процесами використовуються РО:

- заслінки, шибери, вентиля, крани, що впливають на зміну витрати матеріального потоку для регулювання заданого параметра;
- направляючі апарати, що дозволяють змінювати продуктивність тягодуттьових пристроїв;
- плужкові скидачі, які впливають на зміну напрямку потоку сипкої речовини;
- реостати, автотрансформатори, де змінюються сила струму, що забезпечує процес регулювання;
- спеціалізовані пристосування та пристрої, які забезпечують тим чи іншим шляхом зміну регулюючого впливу.

Також в якості РО може використовуватися технологічне обладнання: насоси; компресори; транспортні механізми; шнекові, пластинчаті та дискові живильники.

Серед основних характеристик ВМ слід виділити: вид командного вхідного сигналу; вид енергії, що створює переставне зусилля; величина переставного зусилля; характер руху вихідного елемента ВМ (кутовий, лінійний), швидкість повного ходу вихідного елемента ВМ та інші. Докладніше ознайомитись із характеристиками ВМ та РО пропонується у [7-9].

В комп'ютерних системах керування широке використання отримали електромашинні та електромагнітні ВМ, що пов'язано із зручною інсталяцією та обслуговуванням пристроїв. Найчастіше у вітчизняній практиці автоматизації використовують електроприводи таких виробників: Siemens, Honeywell, Belimo, Danfoss, Johnson Controls, Hartmann & Braun, Kromshcroder, AUMA, BIFFI, ROTORK, REGADA, BAT «ЗЭиМ», ЗАТ

«Тулаэлектропривод», ТОВ «НПП ТЭК», ТОВ «Сибмаш» та інші. На рис. 2.1 представлено устрій електромашинного ВМ.

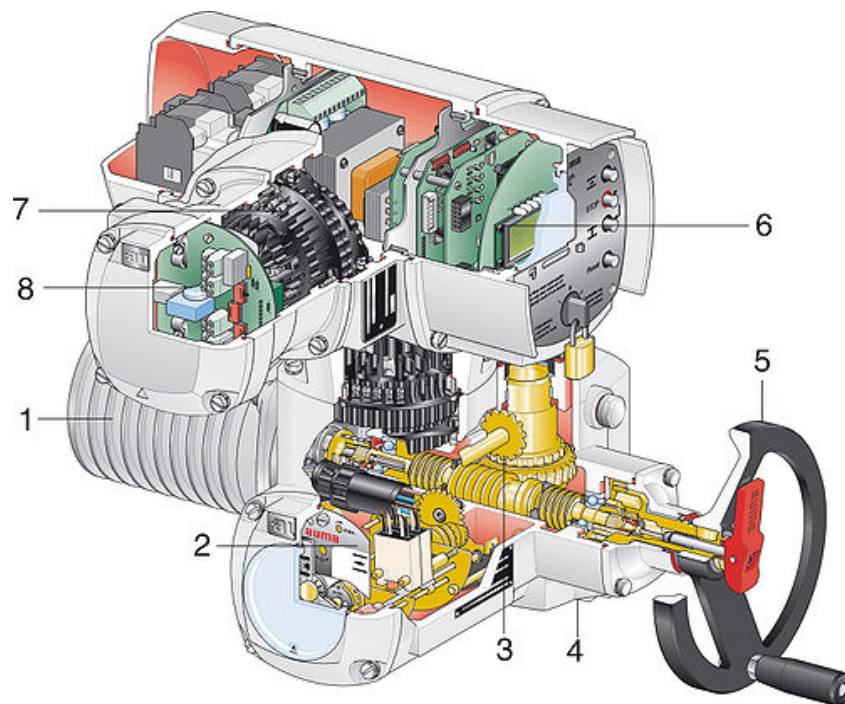


Рис. 2.1. Розріз електромашинного ВМ

У своїй конструкції пристрій містить наступні. 1 - електродвигун, який є джерелом переміщення. Найчастіше в електроприводах використовуються двигуни змінного струму. 2 - силовий обмежувальний пристрій та шляхові вимикачі. Основне призначення - попередження поломки або перевантаження арматури. Іноді виконується із гальмовим (демпфівним) пристроєм, для виключення впливу на арматуру інерції деталей, що рухаються. Шляхові вимикачі служать для сигналізації положення робочого органа, відключення електродвигуна від джерела енергії, блокування роботи двигуна з роботою інших механізмів. Редуктор 3 використовується для перетворення швидкості обертання електродвигуна у відповідне переміщення вихідного валу ВМ (лінійне, кутове). Кріплення 4 складається із фланцевого з'єднання, що кріпиться між корпусом ВМ та арматурою РО, а також муфти, що з'єднує вали ВМ та РО. Ручний дублер –

5. Необхідний для керування РО при налагоджувальних роботах, а також при відсутності енергії для електродвигуна. Містить перемикач ручного керування для запобігання травмування обслуговуючого персоналу, якщо під час ручного керування ВМ буде підключений до електромережі. Показчик положення та датчики привода 6. Показчик положення призначений для місцевої індикації ступеня відкриття РО в будь-який момент часу. Датчик положення робочого валу використовується на запірній арматурі для дистанційної індикації ступеня відкриття РО в конкретний момент часу і служить елементом зворотного зв'язку із регулятором. 7 – бокс клемних електричних з'єднань до яких приєднується кабель живлення ВМ та інформаційний кабель керування від регулятора. Бокс клемних з'єднань промислової мережі – 8. Багато сучасних приводів забезпечуються входами для під'єднання до промислових мереж, що дозволяє забезпечити цифрове керування ВМ.

Керуючий сигнал від ПКК на ВМ може надходити у вигляді:

- цифрових повідомлень за відповідним протоколом промислових мереж [10] (Profibus, ModBus, MP-Bus та інші);
- аналогових уніфікованих електричних сигналів (0...10В, 0...20 мА);
- дискретно-імпульсних електричних сигналів (як правило 0, +24В).

У першому випадку положення вихідного валу залежить від цифрової команди переданої на ВМ (відповідно до формату мережевого протоколу обміну). У другому випадку положення вихідного валу ВМ буде пропорційним потенціалу (або силі струму) що надходить на ВМ від цифро-аналогового перетворювача ПКК. При використанні дискретно-імпульсного керування положення вихідного валу ВМ залежить від кількості та тривалості керуючих імпульсів, а також від інтегруючих властивостей ВМ.

Прикладом використання дискретно-імпульсного керування ВМ може бути лабораторний стенд даної роботи. Спрощена принципова електрична

схема підключення ВМ BELIMO LM230A-SR до ПКК S7386-50D представлена на рис. 2.2.

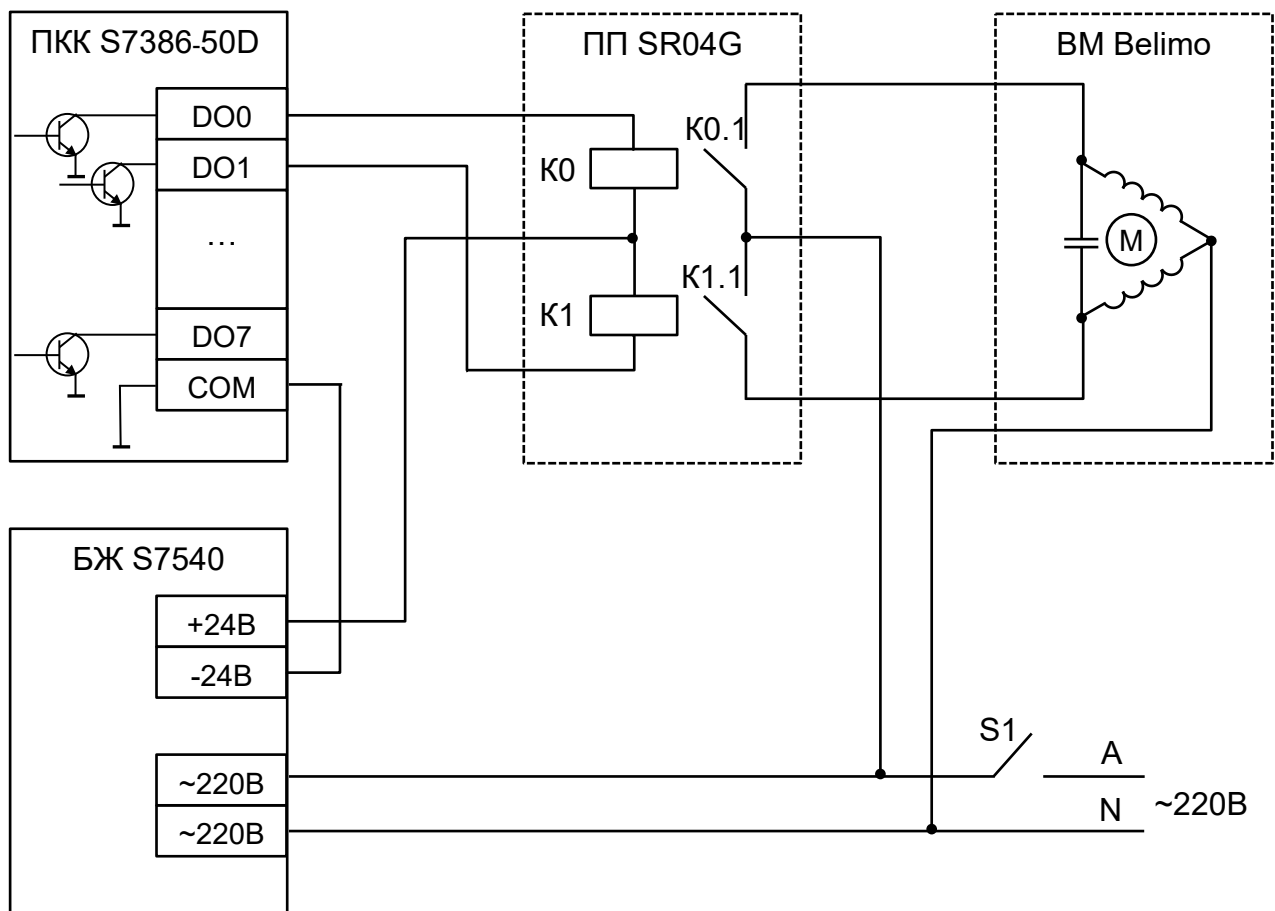


Рис. 2.2. Принципова електрична схема підключення ВМ до ПКК

ПКК S7386-50D та пусковий пристрій (ПП) SR04G живляться постійною напругою +24В за допомогою блока живлення (БЖ) S7540. Якщо ПКК подає дискретний керуючий сигнал на вихід DO0 – починає протікати струм через обмотку реле K0, що приводить до замикання контакту K0.1. В свою чергу, контакт K0.1 забезпечує протікання робочого струму через верхню обмотку електродвигуна (нижня обмотка двигуна буде пусковою), який починає обертатися. У випадку, коли спрацьовує дискретний вихід DO1 – вмикається в роботу реле K1, у якого контакт K1.1 забезпечує протікання робочого струму через нижню обмотку електродвигуна (верхня

обмотка – пускова), що забезпечує обертання асинхронного двигуна в інший бік. Таким чином, відбувається реверс. Одночасне вмикання реле К0 та К1 може вивести ВМ із ладу. Щоб не допустити такої ситуації використовують програмні та апаратні запобіжні заходи від одночасного вмикання К0 та К1. Якщо виходи DO0 та DO1 не активні – електродвигун ВМ не обертається.

Динамічні властивості програмного регулятора ПКК визначаються двома основними елементами – програмним забезпеченням ПКК, що реалізує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) або часо-імпульсну модуляцію (ЧІМ) для керуючого сигналу та властивостями ВМ постійної швидкості. Структурна схема програмного регулятора із дискретно-імпульсним керуванням ВМ представлена на рис.2.3. На цифровий регулятор (ЦР) у k -ті моменти часу із періодом квантування T надходить сигнал неузгодженості $e[kT]$ між завданням та вимірним значенням параметра. За сигналом $e[kT]$ ЦР розраховує керуючий вплив $u[kT]$ (наприклад, за ПІД-законом). ШІМ перетворює керуючий сигнал $u[kT]$ у послідовність імпульсів $x(t)$, ширина яких пропорційна зміні сигналу керування (одночасно ШІМ виконує роль фіксатора нульового порядку). ВМ включається в роботу за допомогою ПП. Основне призначення ПП підсилювати малопотужний імпульсний сигнал $x(t)$ до значення $x^*(t)$, яке дозволяє вмикати асинхронний електродвигун.

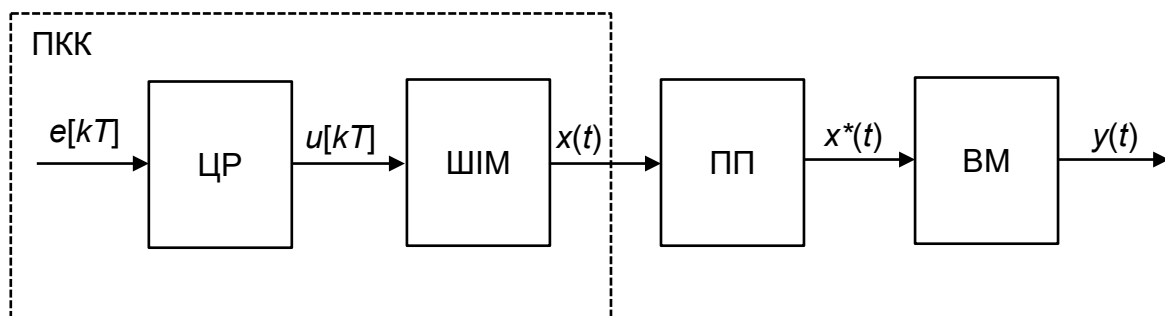


Рис. 2.3. Структурна схема програмного регулятора із дискретно-імпульсним керуванням ВМ

Особливістю електромашиного ВМ постійної швидкості є те, що він розрахований на певну напругу живлення (в нашому випадку $\sim 220\text{В}$) та не може змінювати положення вихідного валу за рахунок зміни напруги живлення [11]. З появою керуючої послідовності імпульсів $x(t)$ ПП подає напругу живлення (сигнал $x^*(t)$) на асинхронний електродвигун ВМ. Обертання ротора електродвигуна через редуктор створює переміщення вихідного валу ВМ $y(t)$ із постійною швидкістю $\frac{dy}{dt} = S_0 = \text{const}$, що впливає на шток РО.

Керуючий вплив $y(t)$ відповідно до заданого закону регулювання (наприклад, ПД-закону) формується шляхом інтегрування імпульсного сигналу $x^*(t)$ ВМ. Робота ВМ характеризується короткочасними включеннями на час тривалості імпульсів Δt_I та відключеннями на час тривалості пауз Δt_{II} .

Під час кожного включення РО переміщається на величину $\Delta y = S_0 \cdot \Delta t_I$, а під час пауз положення РО залишається незмінним $\Delta y = 0$. Завдяки фільтруючим властивостям ОК ступінчате переміщення РО сприймається як лінійне із деякою усередненою швидкістю \bar{y} , що називається швидкістю регулювання. Середнє значення швидкості регулювання характеризується відношенням переміщення РО протягом одного імпульсу $\Delta y = S_0 \cdot \Delta t_I$ до періоду проходження імпульсів $\Delta t_I + \Delta t_{II}$:

$$\bar{y} = S_0 \frac{\Delta t_I}{\Delta t_I + \Delta t_{II}} = S_0 \cdot \gamma, \quad (2.1)$$

де γ - шпаруватість керуючих імпульсів. Таким чином, середня швидкість регулювання \bar{y} пропорційна шпаруватості $\gamma(t)$ керуючих імпульсів $x(t)$, див. рис. 2.4. При цьому переміщення вихідного валу ВМ $y(t)$ пов'язане зі зміною шпаруватості $\gamma(t)$ за інтегральним законом:

$$y(t) = \int_0^t \bar{y}(t) dt = S_0 \int_0^t \gamma(t) dt. \quad (2.2)$$

Тобто за каналом $\gamma \rightarrow y$ ВМ є лінійною інтегруючою ланкою з передатною функцією:

$$W_{BM}(p) = \frac{y(p)}{x(p)} = \frac{S_0}{p}. \quad (2.3)$$

Змінюючи шпаруватість $\gamma(t)$ керуючих імпульсів $x(t)$ залежно від сигналу неузгодженості $e[kT]$, можна одержати необхідний керуючий вплив $y(t)$.

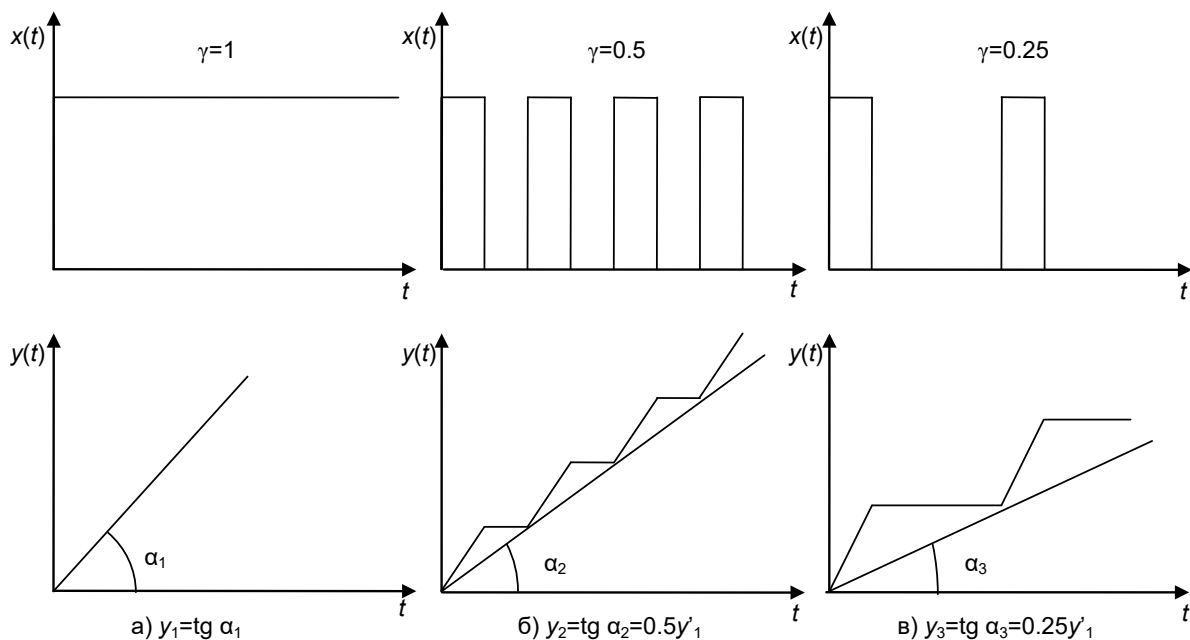


Рис. 2.4. Перехідні процеси ВМ за каналом $\gamma \rightarrow y$: а) $\gamma = 1$, б) $\gamma = 0.5$, в) $\gamma = 0.25$

Хід роботи

1. Підготувати лабораторний стенд до роботи.
2. Подати напругу на стенд.
3. Перевести САК у ручний режим керування.
4. Виміряти час повного ходу вихідного валу ВМ від 0 до 100 %.

5. Змінюючи положення ВМ зняти статичну та динамічну характеристики ВМ. Результати дослідів занести до таблиць 2.1 та 2.2

Таблиця 2.1. Статична характеристика ВМ.

Час керуючого імпульсу γ , с					
Кінцеве положення штока ВМ L , %					

Таблиця 2.1. Динамічна характеристика ВМ.

Час керуючого імпульсу γ , с					
Зміна положення штока ВМ L , %					

6. Змінюючи положення ВМ у ручному режимі за допомогою SCADA-системи зняти тренди керуючих імпульсів та положення ВМ.

Обробка результатів

Заповнити таблиці за п.5. ходу роботи. За даними таблиці 2.1 та 2.2 побудувати статичну та динамічну характеристики ВМ. Визначити передатну функцію ВМ.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити теоретичні відомості, таблиці за п.5. ходу роботи, графіки статичної ($L_{\text{ВМ}} = f(\gamma)$) та динамічної ($L_{\text{ВМ}}(t) = f(\gamma(t))$) характеристик ВМ, тренди керуючих імпульсів та положення ВМ

отриманих у SCADA-системі, розрахунок передатної функції ВМ, висновки.

Контрольні запитання до лабораторної роботи №2

1. Класифікація ВП.
2. Що таке ВМ?
3. Основні характеристики ВМ.
4. Як впливає інерційність ВМ на динаміку САК?
5. Що таке РО?
6. Основні характеристики РО.
7. Що таке витратна характеристика РО?
8. Які витратні характеристики РО Ви знаєте?
9. Конструкція електромашинного ВМ, призначення основних елементів.
10. Розповісти яким чином здійснюється дискретно-імпульсного керування ВМ за рис. 2.2.
11. Призначення ПП у електричній схемі рис. 2.2.
12. Яким чином можна запобігти одночасного вмикання дискретних виходів DO0 та DO1 на рис. 2.2?
13. Прокоментувати структурну схему програмного регулятора із дискретно-імпульсним керуванням ВМ, рис. 2.3.
14. Пояснити що таке середня швидкість регулювання ВМ.
15. Як визначити передатну функцію ВМ?
16. Що характеризує статична характеристика ВМ?
17. Що характеризує динамічна характеристика ВМ?

Лабораторна робота №3

Дослідження динамічних властивостей цифрового регулятора з широтно-імпульсною модуляцією

Мета роботи: експериментально дослідити вплив параметрів цифрового регулятора на його динамічні властивості, порівняти отримані результати з теоретичними.

Теоретичні відомості

Сьогодні при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях, таких як енергетика, металургія, хімія та інших широко використовуються програмно-логічні контролери (ПЛК) та програмно-комп'ютерні контролери (ПКК). В багатьох випадках для зменшення собівартості програмно-технічного комплексу проектні організації використовують релейно-імпульсне керування із виконавчим механізмом (ВМ) постійної швидкості на базі асинхронного електродвигуна. В загальному випадку такі системи можуть формувати пропорційно-інтегрально-диференціальний закон (ПІД-закон) регулювання. Широке поширення таких ВМ пояснюється: простотою електромонтажних та налагоджувальних робіт; зручністю перемикання із ручного на автоматичний режим керування; досить великим зусиллям переміщення на валу; можливістю централізованого керування ВМ й інші.

При формуванні ПІД-закону регулювання на ВМ із релейно-імпульсним керуванням контролер відпрацьовує алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які формуються програмно. Незалежно від виробника мікропроцесорних засобів автоматизації, програмна реалізація широтно-імпульсного керування залишається незмінною. З цих причин важливо вивчити структуру цифрової системи керування із електромашинним ВМ постійної швидкості, спосіб формування тривалості імпульсів для керування асинхронним двигуном ВМ, взаємодію

мікропроцесорного контролера із з ВМ постійної швидкості. Саме ці питанням розглядаються в лабораторній роботі.

Налаштування регулятора проводяться різними методиками, однак в більшості випадків використовуються інженерні методи на основі неперервної моделі ОК. Цифровий ПД–регулятор на практиці реалізується «зв’язкою» програмного регулятора з ВМ, який представляє собою інтегруючу ланку. Для отримання ПД–закону програмний регулятор в загальному випадку повинен формувати керуючий вплив по ПДД²–закону. Для перетворення вихідного сигналу програмного регулятора в дискретні команди керування ВМ застосовують ШІМ [12, 13].

Побудована таким чином квазінеперервна цифрова АСК лише наближено відтворює поведінку неперервної АСК. Керування тим ближче до неперервного, чим менший період квантування цифрового регулятора (ЦР) та менший період модуляції. Однак, потрібно зважати на те, що зменшення періоду модуляції приводить до збільшення частоти спрацювання комутаційної апаратури та вмикання приводу ВМ, що суттєво небажано. Крім того, ВМ не має можливості відреагувати на імпульси малої тривалості, в результаті велика кількість імпульсів ігнорується. Тому, в деяких випадках, якість процесів регулювання на практиці помітно погіршується або навіть стає незадовільною.

У лабораторній роботі реалізована структурна схема ЦР із ШІМ, що розглянуто у лабораторній роботі №2, (див. рис. 2.3). Розглянемо програмну реалізацію ЦР із ШІМ для лабораторного стенду. ПМК S7386–50D запрограмований із використанням мови FBD. Фрагмент програмного коду ЦР зображено на рис. 3.1. Тут FBD блок dPID реалізує цифровий ПД–регулятор. Вхідні і вихідні параметри функціонального блоку dPID представлено у табл.3.1.

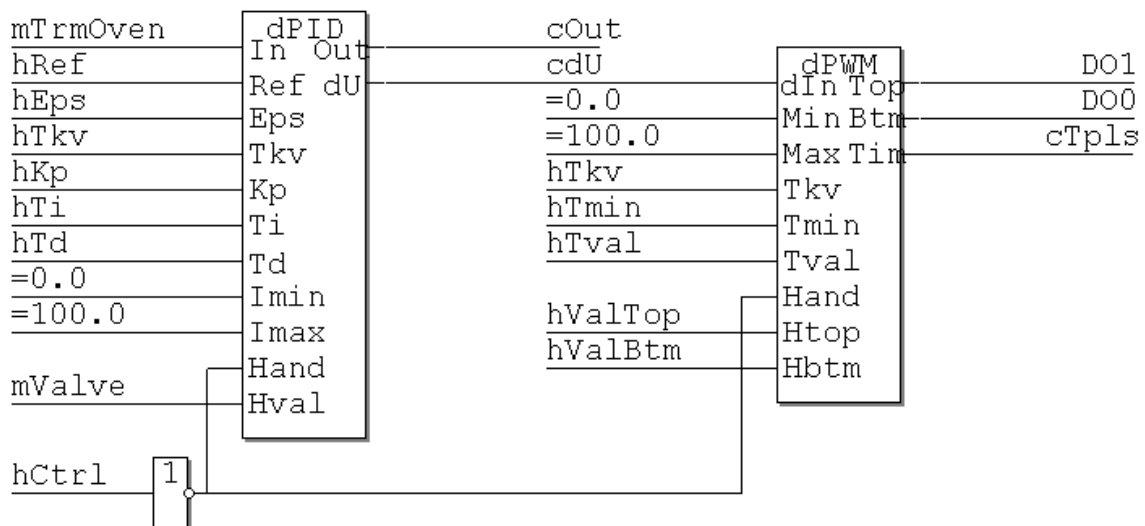


Рис. 3.1. Програма ЦР із ШІМ на мові FBD

Таблиця 3.1. Вхідні та вихідні параметри функціонального блоку dPID

Параметр	Тип	Опис параметру
<i>In</i>	REAL	Вхідний сигнал від датчика
<i>Ref</i>	REAL	Задане значення параметра регулювання
<i>Eps</i>	REAL	Зона нечутливості регулювання
<i>Tkv</i>	REAL	Час квантування, <i>c</i>
<i>Kp</i>	REAL	Коефіцієнт пропорційності ЦР
<i>Ti</i>	REAL	Час інтегрування ЦР, <i>c</i>
<i>Td</i>	REAL	Час диференціювання ЦР, <i>c</i>
<i>Imin</i>	REAL	Мінімальне значення регулюючого впливу
<i>Imax</i>	REAL	Максимальне значення регулюючого впливу
<i>Hand</i>	BOOL	Ознака ручного/автоматичного режиму регулювання
<i>Hval</i>	REAL	Значення керуючого впливу в режимі ручного регулювання
<i>Out</i>	REAL	Регулюючий вплив
<i>dU</i>	REAL	Приріст регулюючого впливу на час квантування <i>Tkv</i>

Розглянемо математичне забезпечення функціонального блоку dPID. В загальному випадку аналоговий ПІД-закон регулювання представляється рівнянням:

$$u(t) = Kp \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(t) dt + Td \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (3.1)$$

де $u(t)$ – регулюючий вплив; $e(t)$ – відхилення регулюючої величини від завдання регулятора; Kp – коефіцієнт пропорційності; Ti – час інтегрування; Td – час диференціювання. В (3.1) замінимо неперервні функції $u(t)$ та $e(t)$ на градчасті:

$$u_i = Kp \left[e_i + \frac{Tkv}{Ti} \left[\frac{e_0 + e_1}{2} + \dots + \frac{e_{i-1} + e_i}{2} \right] + Td \left[\frac{e_{i-1} + e_i}{Tkv} \right] \right], \quad (3.2)$$

тут i – поточний індекс дискретного часу з кроком дискретизації Tkv . Рівняння (3.2) можна привести до вигляду:

$$u_i = u_{i-1} + Kp \left(1 + \frac{Tkv}{2Ti} + \frac{Td}{Tkv} \right) e_i + Kp \left(-1 + \frac{Tkv}{2Ti} - \frac{2Td}{Tkv} \right) e_{i-1} + \frac{KpTd}{Tkv} e_{i-2},$$

або після введення коефіцієнтів

$$u_i = u_{i-1} + A_0 e_i + A_1 e_{i-1} + A_2 e_{i-2}, \quad (3.3)$$

де $A_0 = Kp \left(1 + \frac{Tkv}{2Ti} + \frac{Td}{Tkv} \right)$; $A_1 = -Kp \left(1 - \frac{Tkv}{2Ti} + \frac{2Td}{Tkv} \right)$; $A_2 = \frac{KpTd}{Tkv}$.

Використовуючи форму запису (3.3), оцінка коефіцієнтів A_0 , A_1 , A_2 еквівалентна оцінці коефіцієнтів Kp , Ti , Td при сталому Tkv [14].

Вхідні та вихідні параметри алгоблоку dPID пов'язані із (3.3) наступними залежностями:

$$e_i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |e_i| \leq Eps; \\ e_i - Eps, & \text{якщо } e_i > Eps; \\ e_i + Eps, & \text{якщо } e_i < -Eps; \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Out = \begin{cases} u_i, & \text{якщо } Imin \leq u_i \leq Imax; \\ Imin, & \text{якщо } u_i < Imin; \\ Imax, & \text{якщо } u_i > Imax; \\ Hval, & \text{якщо } Hand = 1; \end{cases} \quad (3.5)$$

$$dU = u_i - u_{i-1} \quad (3.6)$$

Залежності (3.3) – (3.6) складають математичний опис алгоблоку dPID.

Функціональний блок dPWM виконує функції ШІМ. Вхідні та вихідні параметри алгоблоку dPWM представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Вхідні та вихідні параметри функціонального блоку dPWM

Параметр	Тип	Опис параметру
<i>dIn</i>	REAL	Приріст вхідного сигналу від регулятора
<i>Min</i>	REAL	Мінімальне значення вхідного сигналу
<i>Max</i>	REAL	Максимальне значення вхідного сигналу
<i>Tkv</i>	REAL	Час квантування, <i>c</i>
<i>Tmin</i>	REAL	Мінімальна тривалість регулюючого імпульсу, <i>c</i>
<i>Tval</i>	REAL	Час повного ходу ВМ, <i>c</i>
<i>Hand</i>	BOOL	Ознака ручного/автоматичного режиму регулювання
<i>Htop</i>	BOOL	Ручний вплив «більше»
<i>Hbtm</i>	BOOL	Ручний вплив «менше»
<i>Top</i>	BOOL	Регулюючий вплив «більше»
<i>Btm</i>	BOOL	Регулюючий вплив «менше»
<i>Tim</i>	REAL	Тривалість регулюючого імпульсу, <i>c</i>

Розглянемо математичне забезпечення алгоблоку dPWM. Ініціалізація функціонального блоку виконується визначенням масштабуючого коефіцієнту:

$$\begin{cases} K = \frac{Tval}{Max - Min}; \\ Tk = 0; \end{cases} \quad (3.7)$$

де *Tval*, *Max*, *Min* – параметри з табл. 3.2; *Tk* – коригуюче значення тривалості імпульсу.

Тривалість імпульсу регулювання на i – тому кроці дискретного часу розраховується за формулою

$$dT_i = K \cdot dln + Tk. \quad (3.8)$$

Далі, розраховується значення Tk та коригується dT_i на основі залежності:

$$Tk = \begin{cases} dT_i, & \text{якщо } |dT_i| \leq T_{min}, \text{ тоді } dT_i = 0; \\ dT_i - Tk_v, & \text{якщо } dT_i > Tk_v, \text{ тоді } dT_i = Tk_v; \\ dT_i + Tk_v, & \text{якщо } -dT_i > Tk_v, \text{ тоді } dT_i = -Tk_v; \end{cases} \quad (3.9)$$

Вихідні параметри алгоблоку Top , Btm та Tim прийматимуть значення за формулами:

$$Top = \begin{cases} 1, & \text{якщо } dT_i > 0, \text{ або } Hand = 1 \ \& \ Htop = 1; \\ 0, & \text{якщо } dT_i < 0; \end{cases} \quad (3.10)$$

$$Btm = \begin{cases} 1, & \text{якщо } dT_i < 0, \text{ або } Hand = 1 \ \& \ Hbtm = 1; \\ 0, & \text{якщо } dT_i > 0; \end{cases} \quad (3.11)$$

$$Tim = |dT_i|. \quad (3.12)$$

Залежності (3.7)–(3.12) складають математичний опис функціонального блоку dPWM. Тривалість імпульсу регулювання dT_i на i -тому кроці дискретного часу (3.8) пропорційна зміні вхідного сигналу dln із обмеженнями на мінімальну тривалість імпульсу T_{min} та період квантування Tk_v . Якщо час імпульсу $|dT_i| > Tk_v$, то тривалість імпульсу $Tim = Tk_v$ на i -тому кроці, а на $i+1$ кроці значення dT_{i+1} коригується на величину Tk за (3.9).

Мінімальна тривалість імпульсу визначається із технічних характеристик проміжного підсилювача ПП та часу включення ВМ. За практичними рекомендаціями $[0.1, 0.5] < T_{min} < Tk_v$. Якщо $T_{min} > Tk_v$ можливий автоколивальний режим в межах зони нечутливості ЦР при виході АСК на завдання. Період дискретизації Tk_v залежить від динамічних властивостей об'єкта керування (ОК). Для його визначення існує багато

методик [14]. На практиці T_{kv} часто вибирають на порядок меншим за постійну часу ОК.

Ідеальний ПІД-закон регулювання (3.1) та його технічна реалізація із ШІМ (3.3) – (3.12) на ПМК можуть суттєво відрізнятися. Значний вплив на динаміку реального ЦР вносять: інтегруючі властивості ВМ; люфти редуктора; вибіг сервомотора ВМ та інше.

Як приклад, продемонструємо вплив інтегральної ланки електромашинного ВМ на динамічні властивості реального цифрового ПІ-регулятора із ШІМ. Розглянемо рис. 3.2.

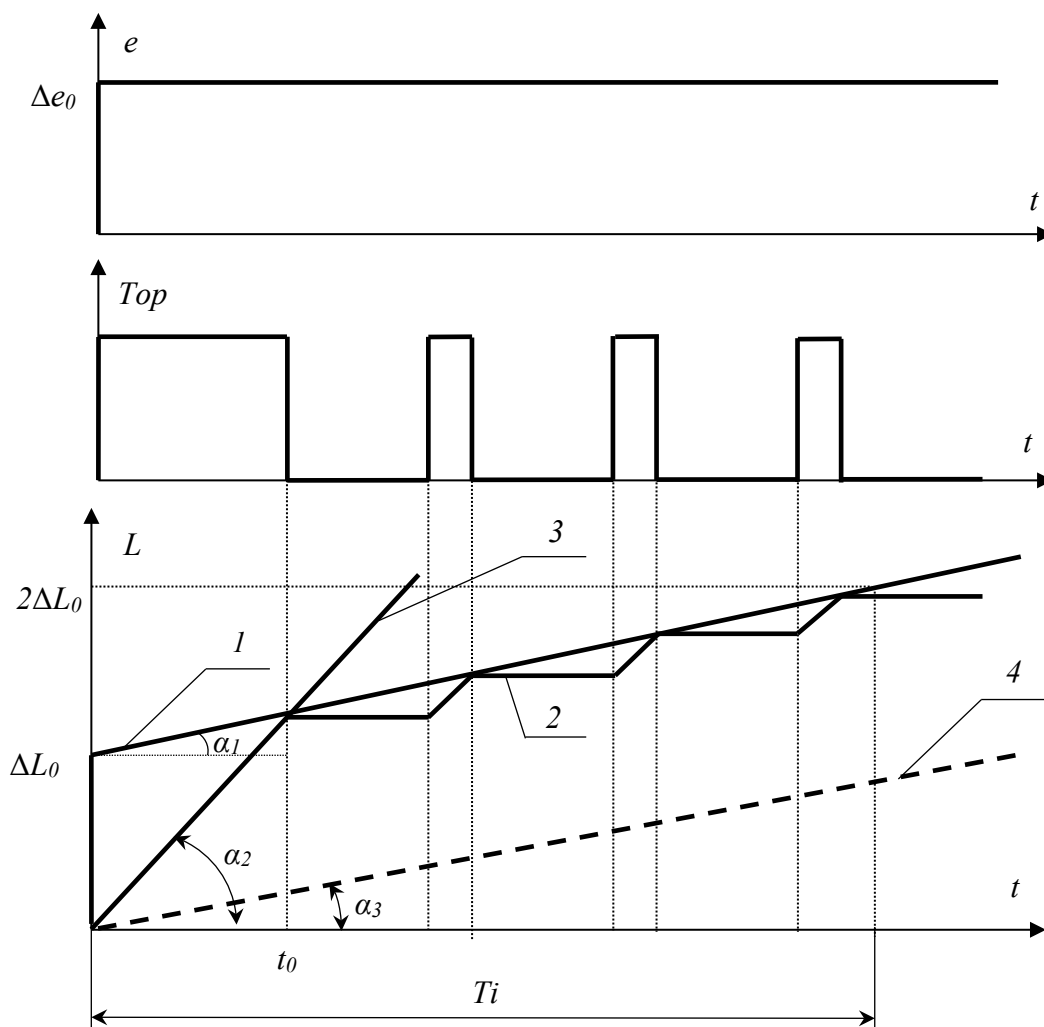


Рис. 3.2. Перехідні процеси для ПІ-регулятора

Із теорії керування відомо, що при ступінчастому відхиленні регулюючої величини від завдання $\Delta e_0 = Ref - In$ в ідеальному ПІ-регуляторі за рахунок пропорційної складової вал ВМ миттєво переміститься на величину $\Delta L_0 = Kp \Delta e_0$. В наступний момент часу проявиться дія інтегральної частини регулятора, яка за час Ti подвоїть переміщення валу ВМ на $2\Delta L_0$. За часом переміщення валу ВМ можна визначити час інтегрування Ti . В реальному ЦР із ШІМ переміщення ВМ під впливом пропорційної частини регулятора проходить не миттєво, а протягом часу t_0 (до першої зупинки ВМ). Далі, переміщення валу ВМ буде переривчасте та залежатиме від тривалості і частоти керуючих імпульсів T_{op} , які генерує dPWM. В результаті отримаємо криву 2, яка має ступінчастий вигляд та наближено описує переміщення валу ВМ із ідеальним ПІ-регулятором (крива 1). Можна зробити висновок, чим більша швидкість переміщення валу ВМ, тим краще ЦР відпрацьовує ідеальний закон регулювання.

Великий вплив на технічну реалізацію програмного регулятора із ШІМ має інтегральна складова ВМ. Прямою 3 на рис. 3.2 показано перехідний процес інтегруючого електромашинного ВМ, для якого швидкість переміщення валу ВМ визначається як $tg\alpha_2$. У випадку коли $\alpha_1 \ll \alpha_2$ програмний ПІ-регулятор із ВМ технічно реалізується, що графічно продемонстровано кривою 2. Якщо швидкість переміщення валу ВМ незначна $\alpha_1 \gg \alpha_3$ (графік 4), то ЦР в комплекті із таким ВМ зможе реалізувати тільки І-закон регулювання. Кути α_1, α_2 визначаються як:

$$\alpha_1 = \text{arctg}\left(\frac{Kr}{Ti}\right); \alpha_2 = \text{arctg}\left(\frac{100}{T_{val}}\right), \text{ де } T_{val} - \text{час повного переміщення валу}$$

ВМ від 0% до 100%.

Послідовність виконання роботи

Попередня підготовка

1. Для виконання лабораторної роботи попередньо необхідно задатись параметрами налаштування для П–, ПІ– та ПІД–регулятора. П– та ПІ–закони регулювання визначаються відповідними налаштуваннями ПІД–регулятора.
2. Для алгоблоку dPID в ПКК необхідно ввести: Eps , Tkv , Kp , Ti , Td , (див. табл. 3.1).
3. Для алгоблоку dPWM необхідно задати: $Tmin$, $Tval$, (див. табл. 3.2.)
4. Набір параметрів п.2, п.3 необхідно визначити для П–, ПІ– та ПІД–регулятора. Td визначати за формулою $Td^{\circ} = 0.15Ti$. Параметром Ti для ПІ–, ПІД–закону задатися виходячи із технічної реалізації ЦР. Параметрами Kp та e_0 задатися виходячи із можливості спостерігати перехідний процес ЦР в діапазоні ходу валу ВМ 0%...100%. Заповнити табл. 3.3. із розрахованими налаштуваннями.

Таблиця 3.3. Розраховані параметри налаштування ЦР

ЦР	$e_0=Ref-In$, °C	Eps , °C	Tkv , с	Kp , %/°C	Ti , с	Td , с	$Tmin$, с	$Tval$, с
П								
ПІ								
ПІД								

Виконання лабораторної роботи

1. Подати живлення на лабораторний стенд.
2. Перевірити працездатність лабораторного стенду.
3. Перемикач ІД (імітатор датчика) перевести в режим імітатора сигналу датчика.
4. Потенціометр імітатора сигналу датчика встановити на 50% діапазону та визначити значення імітованої температури. Встановити виміряне

- значення в якості завдання для АСК температури печі. Розбаланс регульованої величини повинен прийняти нульове значення.
5. Перевести АСК печі в ручний режим регулювання. Встановити положення ВМ на 50%.
 6. Ввести значення зони нечутливості регулювання E_{ps} . Переконавшись, що імітоване значення температури в печі та завдання АСК знаходяться в межах зони нечутливості.
 7. Встановити налаштування параметрів П-регулятора.
 8. Перевести АСК печі в автоматичний режим роботи.
 9. Провести перевірку зони нечутливості, за рахунок зміни температури в печі імітатором датчика.
 10. Перевести АСК в ручний режим регулювання. Встановити положення ВМ на 10%.
 11. Переконавшись, що імітоване значення температури в печі та завдання АСК знаходяться в межах зони нечутливості.
 12. Встановити налаштування параметрів ПІ-регулятора.
 13. Перевести АСК в автоматичний режим роботи.
 14. Нанести позитивне ступінчасте збурення розбалансу на ЦР шляхом зміни завдання в АСК.
 15. Зняти розгінну характеристику ПІ-регулятора. Експеримент повторити двічі для різних значень розбалансу. Результати двох експериментів занести в табл. 3.4.

Таблиця 3.4. Розгінні характеристики ПІ – регулятора

№	t, c	
1	$e_1, ^\circ C$	
	$L_1, \%$	
2	$e_2, ^\circ C$	
	$L_2, \%$	

16. Повторити п.10 – п.14 для ПІД-регулятора. Результати експериментів занести в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Розгінні характеристики ПІД-регулятора

№	t, c	
1	$e_1, ^\circ C$	
	$L_1, \%$	
2	$e_2, ^\circ C$	
	$L_2, \%$	

Обробка результатів

- Побудувати графіки розгінних характеристик для ПІ- та ПІД-регуляторів за результатами табл. 3.4 та табл. 3.5.
- Провести нормування розгінних характеристик до перехідних для ПІ- та ПІД-регуляторів за формулою $u_{ji} = \frac{L_{ji} - L_{j0}}{e_{ji} - e_{j0}}$, де j – номер експерименту, i – індекс поточної точки. Для ПІ- та ПІД-закону результати осереднити за формулою $\bar{u}_i = \frac{u_{1i} + u_{2i}}{2}$, та занести у табл. 3.6 та табл. 3.7 відповідно.

Таблиця 3.6. Перехідні характеристики ПІ-регулятора

№	t, c	
1	$u_1, \%$	
2	$u_2, \%$	
3	$\bar{u}, \%$	

Таблиця 3.7. Перехідні характеристики ПІД-регулятора

№	t, c	
1	$u_1, \%$	
2	$u_2, \%$	
3	$\bar{u}, \%$	

3. За результатами усереднених перехідних характеристик ПІ– та ПІД–регуляторів побудувати графіки. На графіках показати параметри регуляторів.
4. Порівняти отримані результати із теоретичними, зробити висновки.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити: теоретичні відомості; розраховані параметри налаштування ЦР (табл. 3.3); таблиці з експериментальними даними розгінних характеристик ПІ– та ПІД–регулятора (табл. 3.4 та табл. 3.5); графіки розгінних характеристик для ПІ– та ПІД–регулятора; таблиці з нормованими розгінними характеристиками та усередненими результатами експерименту ПІ–, ПІД–регулятора (табл. 3.6 та табл. 3.7); графіки усереднених перехідних процесів для ПІ– та ПІД–регулятора із нанесеними параметрами налаштування для регуляторів; висновки.

Контрольні запитання до лабораторної роботи №3

1. Прокоментувати хід виконання лабораторної роботи.
2. Які розрахунки необхідно представити у звіті лабораторної роботи?
3. Описати порядок обробки даних, отриманих в ході експерименту.
4. Провести аналіз параметрів, ПІ–та ПІД–регуляторів на графіках їхніх перехідних характеристик.
5. Які переваги та недоліки використання ВМ постійної швидкості ? Чим це обумовлено?
6. Особливості практичної реалізації цифрового ПІД–регулятора (3.3).
7. Як впливає період квантування T_{kv} на динамічні властивості ЦР.
8. З яких причин погіршується якість регулювання при малих значеннях T_{min} ЦР із ШІМ, який ефект на ВМ при цьому спостерігається?
9. Записати передатну функцію та диференціальне рівняння ПІД–регулятора.

10. Прокоментувати призначення вхідних та вихідних параметрів алгоблоку dPID.
11. Який взаємозв'язок між тривалістю імпульсу ШІМ та вхідним сигналом dIn , що надходить на алгоблок dPWM?
12. З яких міркувань обирається мінімальна тривалість імпульсу T_{min} та період дискретизації T_{kv} ?
13. Яким чином параметри ШІМ впливають на якість роботи АСК?
14. Яким чином параметри ЦР впливають на якість роботи АСК?
15. Чи зміняться налаштування програмного регулятора із ВМ, якщо параметр T_{val} алгоблоку dPWM збільшити у 2 рази? Відповідь обґрунтуйте.
16. Чи зміняться налаштування програмного регулятора із ВМ, якщо замінити ВМ на інший із швидкістю ходу у два рази більшою? Відповідь обґрунтуйте.
17. Яким чином визначається напрямок переміщення ВМ у алгоблоці dPWM?
18. Прокоментувати, як встановити нульові початкові умови для отримання розгінних характеристик ЦР?
19. Для чого потрібна перевірка входження імітованого значення температури та сигналу завдання в зону нечутливості?

Лабораторна робота №4

Ідентифікація динамічних властивостей електричної печі

Мета роботи: практично закріпити знання методів наближеної оцінки динамічних властивостей об'єктів керування.

Теоретичні відомості

Дослідження АСК на інженерному рівні, як правило, передбачає їхнє математичне моделювання у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь. Тим самим окремі елементи системи та АСК в цілому розглядаються як динамічний об'єкт із зосередженими параметрами. Джерелом інформації для побудови моделі об'єкта керування (ОК) можуть бути аналітичні дослідження, або результати спеціально поставлених експериментів [15].

Найбільш поширеним методом експериментального визначення динамічних властивостей ОК є метод часових характеристик. Цей метод базується на дослідженні поведінки ОК після нанесення тестового збурення [6]. В залежності від виду тестового збурення отримують перехідні, імпульсні або частотні характеристики ОК.

Динамічні властивості ОК визначають у різних режимах роботи об'єкта за спеціальними програмами. Зазвичай достатньо визначити перехідні характеристики у двох крайніх режимах роботи обладнання, наприклад за мінімальної та максимальної потужності. Деколи обмежуються експериментом у номінальному режимі роботи обладнання і за результатами розраховують динамічні властивості ОК. Експериментальне визначення динамічних властивостей ОК методом часових характеристик можна розділити на ряд етапів [15]. Коротко прокоментуємо кожний етап.

Попередня підготовка проведення експерименту. На даному етапі вивчають призначення ОК в технологічній схемі, вхідні та вихідні змінні,

допустимі границі їх варіації, можливі наслідки при порушенні технологічних режимів, методи швидкого повернення ОК на усталений режим, можливість контролю вхідних та керування вихідними змінними. Метою попередньої підготовки ОК є вибір: методу дослідження; каналів впливу; величини та форми збурюючих впливів.

При підготовці експерименту для визначення динамічних характеристик аналізують статичну характеристику ОК. За статичною характеристикою вибирають близькі до лінійного режими роботи ОК і значення припустимих вхідних впливів виходячи із технологічних умов.

Якщо особливих обмежень на проведення експерименту немає, то для отримання часових характеристик використовують ступінчасте збурення величиною 10-15% від номінального значення конкретного параметра. За наявності технологічних обмежень або значної чутливості ОК, використовують імпульсні або хвильові імпульсні збурення.

Дообладнання установки вимірювальними та регулювальними приладами. Етап передбачає встановлення додаткового обладнання необхідного для проведення експерименту. Серед додаткового обладнання можуть бути: багатоканальні цифрові осцилографи; програмно-технічні засоби для контролю та стабілізації відповідних вхідних та вихідних змінних матеріальних потоків. Варто також пам'ятати про точність вимірювання вхідних та вихідних величин, враховуючи швидкодію приладів. Вимірювальні та/або регулюючі прилади повинні мати швидкодію принаймні на порядок вищу ніж швидкодія ОК.

Безпосередня підготовка проведення експерименту. На цьому етапі експериментатори займають свої місця, переводять технологічну установку в режим ручного керування, вмикають усі допоміжні програмно-технічні засоби додаткового контролю та стабілізації параметрів.

Технологічна установка повинна бути виведена у строго статичний режим на заданому діапазоні зміни параметрів.

Проведення експерименту. Етап розпочинається з моменту нанесення збурення. За допомогою SCADA – системи, що сконфігурована для проведення експерименту фіксується значення вхідного впливу, вихідна величина контрольованої змінної (технологічного параметру), дата, час, номер досліду і т.д. Експеримент триває поки вихідна величина не вийде на нове значення усталеного режиму ОК, при цьому дискретність контролю повинна забезпечити квазінеперервний характер експериментальної часової характеристики. Із практичних рекомендацій відомо, що дискретність контролю повинна бути на порядок меншою за сталу часу ОК, яка характеризує акумулюючу здатність ОК. Дослід бажано проводити декілька разів в однаковому режимі для того, щоб отримати достовірні результати. Для перевірки лінійності ОК характеристики знімають при різних величинах збурення та різних діапазонах роботи ОК.

Обробка результатів експерименту. Результати, отримані в ході експерименту, потрібно представити у вигляді графіків перехідних процесів на одній площині з метою порівняння їх між собою та отримання достовірної часової характеристики. Попередньо, кожен розгінну характеристику згладжують.

При експериментальному дослідженні ОК практично завжди отримані розгінні характеристики спотворені випадковими збуреннями промислових завод. Щоб відокремити перехідну характеристику від випадкових шумів застосовують методи згладжування. Серед методів згладжування найбільш поширеними є метод ковзного осереднення, експоненціального згладжування, найменших квадратів, сплайн-функцій і т.д. [15 – 18]. Кожний із методів має свої переваги, а ефективність згладжування залежить від конкретного випадку.

Згладжування часових характеристик ковзним усередненням полягає в послідовному усередненні ординат прилеглих точок на інтервалі згладжування t_3 :

$$t_3 = m \Delta t; \quad (4.1)$$

де Δt – крок дискретизації контрольованого параметру між сусідніми точками, m – кількість точок, за якими проводиться згладжування на інтервалі t_3 . Згладжування ковзним усередненням виконується за формулою:

$$y_{i+\frac{m}{2}}^3 = \frac{1}{m+1} \sum_{j=0}^m y_{i+j}^e, \quad i \in [0; n-m]; \quad (4.2)$$

де y_i^3 – ординати усереднених точок; y_i^e – ординати експериментально отриманих точок; n – кількість експериментально отриманих точок. Використовуючи даний метод потрібно пам'ятати про вплив діапазону згладжування та кількості експериментальних точок на якість обробки, втрату $m/2$ – експериментальних точок на початку та в кінці масиву даних. Якість згладжування оцінюють візуально, якщо результат незадовільний – збільшують інтервал згладжування.

Також, на практиці часто використовується експоненціальне згладжування. Цей метод базується на припущенні, що ОК має значно більшу інерційність порівняно із завадою (на один або декілька порядків) [15]. Якщо маємо результати експерименту $y^e(t) = y(t) + \delta(t)$, де $y(t)$ – корисний сигнал, а $\delta(t)$ – сигнал завади, то для виділення корисного сигналу із виміряного можна використати низькочастотний аперіодичний фільтр з передатною функцією

$$W_{H\Phi}(p) = \frac{1}{T_\Phi p + 1}. \quad (4.3)$$

Стала часу фільтру T_ϕ визначається за нерівністю $T_\delta \ll T_\phi \ll T_{OK}$, де T_δ – стала часу завад, T_{OK} – стала часу ОК. Використання низькочастотного фільтру (4.3) на комп’ютерній техніці передбачає його дискретизацію:

$$y_i^3 = a_0 y_{i-1}^3 + a_1 y_i^e; \quad (4.4)$$

де $a_1 = \frac{\Delta t}{T_\phi}$, $a_1 \in [0.1; 0.9]$; $a_0 = 1 - a_1$.

Далі, згладжену розгінну характеристику нормують до перехідної, за залежністю:

$$y_i^H = \frac{y_i^3 - y_0^3}{x_n - x_0}, \quad i \in [0; n]; \quad (4.5)$$

де x_0 – значення вхідного впливу на ОК в нульовий момент часу, x_n – значення вхідного впливу після нанесення ступінчатого збурення.

Як правило, експериментальне дослідження проводиться при різних величинах збурення та в різних діапазонах роботи ОК. При цьому отримують сімейство розгінних характеристик, які необхідно згладити та нормувати до перехідних. Якщо нормовані перехідні характеристики відмінні більше ніж на 5% [15], то отримані експериментальні дані не можна використовувати для подальшої апроксимації. Це свідчить про те, що статична характеристика ОК має значну нелінійність, або присутня низька відтворюваність експериментальних даних, які не можна використовувати для подальших розрахунків. В цьому випадку потрібно визначити реальний діапазон роботи ОК і повторити експеримент.

Якщо отримані експериментальні дані відмінні менше ніж на 5%, то нормовані перехідні характеристики осереднюються за формулою

$$y_i^c = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k y_{i,j}^H, \quad (4.6)$$

де k – кількість проведених експериментів, y_i^c – усереднене значення точки перехідної характеристики, $y_{i,j}^H$ – нормоване згладжене значення точки j -того експерименту $j \in [1; k]$.

Апроксимація часових характеристик. Етап передбачає методи вираження отриманих динамічних характеристик ОК у вигляді наближеної математичної залежності, яке називається – апроксимацією. При апроксимації часових характеристик допускають припущення про лінійність ОК. В залежності від попереднього аналізу складності ОК та необхідної точності використовуються різні методи апроксимації [5 – 8], в результаті використання яких для однієї динамічної характеристики можна отримати різні математичні залежності. Знаходження апроксимуючої передатної функції пов'язано з вибором її структури, порядку, а також визначенням значення коефіцієнтів апроксимуючої залежності.

Спочатку аналізують вигляд кривої перехідної характеристики ОК. Визначається наявність чи відсутність властивості самовирівнювання. Об'єкт у якого присутнє позитивне самовирівнювання, називають статичним. Перехідна характеристика такого об'єкта зображена на рис. 4, а. Його особливість полягає в тому, що після нанесення збурення регульована величина стабілізується на новому рівні. ОК із негативним самовирівнюванням, називають астатичним. Як видно, на графіку перехідної характеристики рис. 4, б після нанесення збурення у ОК не відбувається стабілізація вихідної величини на новому рівні, а встановлюється постійна швидкість зміни регульованої величини.

В інженерних розрахунках зазначені перехідні характеристики апроксимують передаточними функціями:

для статичного ОК (рис. 4.1, а) – аперіодичною ланкою із запізненням

$$W_{OK}(p) = \frac{K_{OK}}{T_{OK}p + 1} e^{-p\tau_{OK}}, \quad K_{OK} = \frac{\Delta y}{\Delta x}; \quad (4.7)$$

для астатичного ОК (рис. 4.1, б) – інтегруючою ланкою із запізненням

$$W_{OK}(p) = \frac{K_{OK}}{p} e^{-p\tau_{OK}}, \quad K_{OK} = \frac{tg(\alpha)}{\Delta x}. \quad (4.8)$$

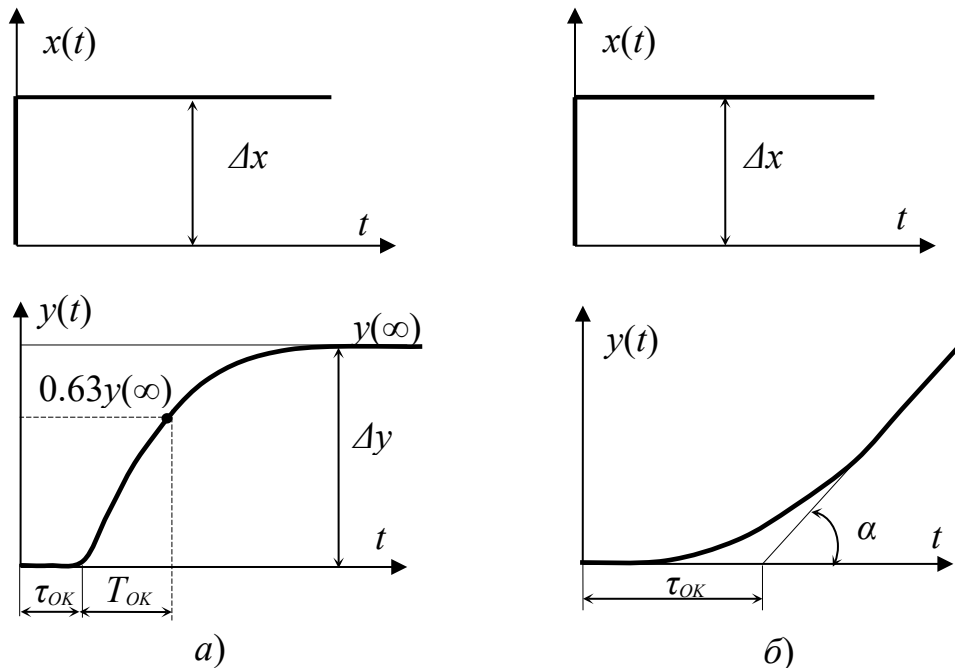


Рис. 4.1. Графіки перехідних процесів: а – статичного ОК;
б – астатичного ОК

Розглянемо декілька інженерних методів апроксимації багатоємнісних ОК із позитивним самовирівнюванням, враховуючи їх широке застосування на виробництві. Перехідні характеристики багатоємнісних ОК з достатньою точністю можна апроксимувати передатними функціями першого порядку із запізненням.

Одним зі способів обробки кривих розгону є метод використання співвідношення $2/3 y(t)$, який умовно складається з трьох етапів. Перший етап передбачає апроксимацію перехідної характеристики ланкою чистого запізнення з параметром τ_{OK} , який визначають як час від початку нанесення збурення до початку зміни вихідної величини. Наступний крок – визначення

коефіцієнта підсилення K_{OK} за залежністю (4.7). На третьому етапі визначається стала часу T_{OK} об'єкта (рис. 4, *a*) за наступною послідовністю дій.

1. На перехідній характеристиці визначаємо відрізок осі ординат, що дорівнює $y(\infty)$.
2. Відрізок $y(\infty)$ поділяємо у співвідношенні 0.632/0.368.
3. Через точку поділу відрізка $y(\infty)$ на долі 0.632 і 0.368 проводимо горизонталь до перетину з перехідною характеристикою $y(t)$. Досить часто замість наведеного вище відношення використовують відношення 0.666/0.333, що відповідає $2/3:1/3 = 2/1$, звідси назва методу.
4. З точки перетинання горизонталі з перехідною характеристикою опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис, який відтинає відрізок осі абсцис (часу) від початку координат, що рівний сталій часу T_{OK} (див. рис. 4.1, *a*)

У [16] розглянуто модифікований метод апроксимації перехідної характеристики ОК. Суть якого полягає у тому, що в розрахунок закладаються координати декількох точок динамічної характеристики. В результаті цього, апроксимуюча перехідна характеристика, побудована на основі результатів апроксимації, обов'язково повинна співпадати з вихідними даними у трьох точках (2 обрані і початок координат).

Модифікований метод логарифмування не потребує проведення обчислень логарифмування поточних значень на кожному кроці на відміну від звичайного методу логарифмування. Ідея методу полягає у виборі характерних точок – A , B на перехідній характеристиці ОК, які визначають 33% та 70% від усталеного режиму ОК. На рис. 4.2 зображено графічне представлення апроксимації для даного методу.

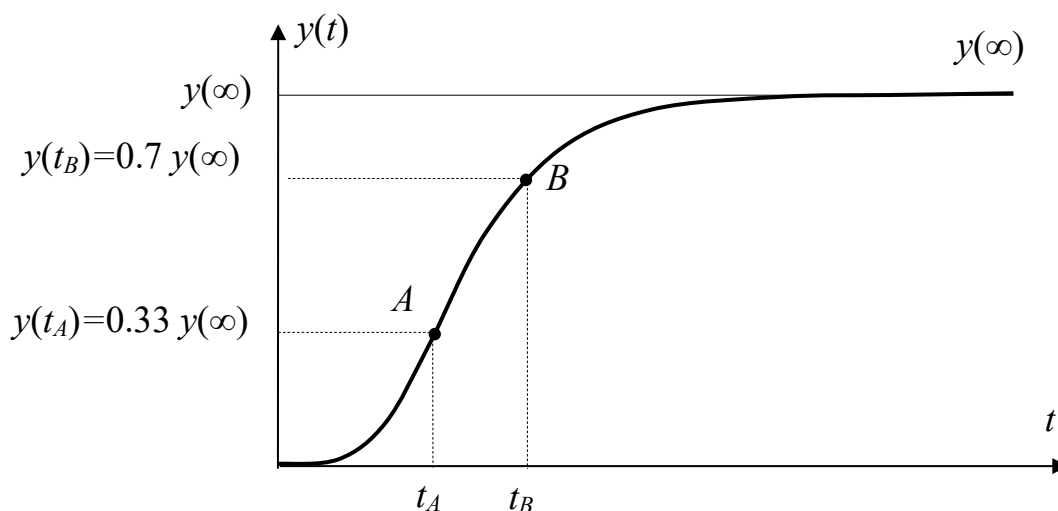


Рис. 4.2. Графічне представлення апроксимації модифікованим методом логарифмування

Згідно методу стала часу T_{OK} та час запізнювання τ_{OK} визначається за залежностями:

$$T_{OK} = 1.25(t_B - t_A), \quad \tau_{OK} = 0.5(3t_A - t_B); \quad (4.9)$$

де t_A – час, коли $y_A(t_A) = 0.33 y(\infty)$; t_B – час, коли $y_B(t_B) = 0.7 y(\infty)$.

Для застосування (4.9) потрібно:

- знайти значення t_A , t_B , що відповідають значенням вихідної величини $y_A = 0.33 y(\infty)$ та $y_B = 0.7 y(\infty)$ відповідно;
- підставити значення t_A , t_B у (4.9) та розрахувати параметри T_{OK} , τ_{OK} .

Коефіцієнт передачі K_{OK} визначається за залежністю (4.7).

Проте, ступінь адекватності апроксимації перехідної характеристики ОК аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням не завжди задовольняє. Наприклад, якщо великий діапазон частот, в якому працює АСК, отримана модель ОК у вигляді (4.7) буде спотворювати вихідний сигнал ОК на великих частотах. Тому інколи перехідні характеристики ОК необхідно апроксимувати передаточними функціями високого порядку. Для цього випадку непогані результати апроксимації можна отримати використавши метод Симаю, або метод найменших квадратів [4 – 8].

Оцінка адекватності апроксимації. Результати апроксимації, потребують додаткового аналізу. Як правило, оцінюється адекватність отриманої моделі ОК, порівнюючи результат апроксимації із усередненою експериментальною перехідною характеристикою. На рис.°4.3 представлено усереднену експериментальну перехідну характеристику 1 та апроксимуючу 2.

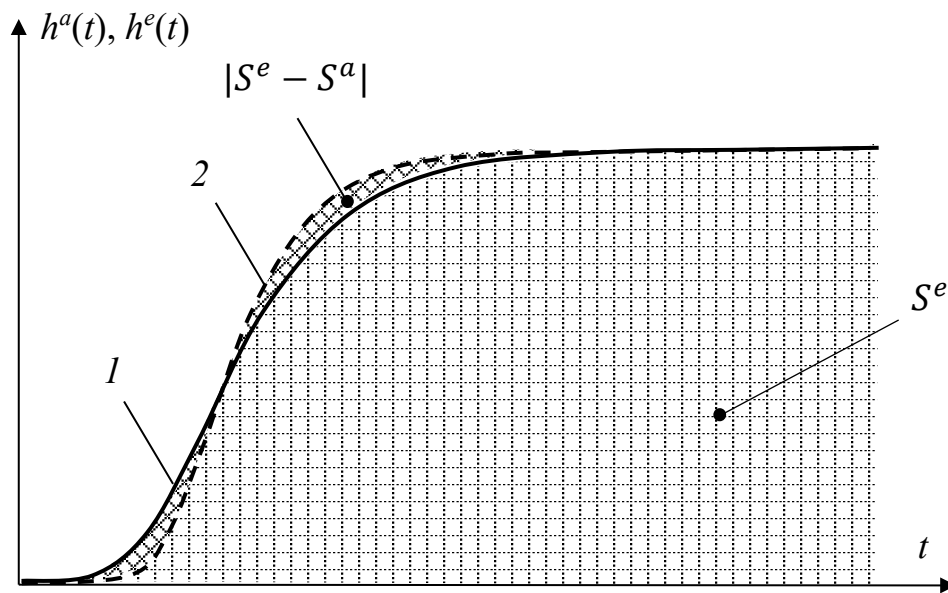


Рис. 4.3. Графічне представлення оцінки адекватності апроксимуючої моделі: 1 – усереднена експериментальна часова характеристика; 2 – апроксимована часова характеристика

Як видно, на рис. 4.3 площі під перехідними характеристиками дещо відрізняються. Щоб оцінити відносну похибку апроксимації – необхідно порівняти площі під кривими, використавши залежність:

$$\varepsilon = \frac{|S^e - S^a|}{|S^e|} 100\%; \quad (4.10)$$

де S^e – площа під нормованою усередненою експериментальною кривою, S^a – площа під кривою, що отримана в результаті апроксимації.

Площу під кривими перехідних процесів можна визначити чисельно, скориставшись методом трапецій, прямокутників, або будь-яким іншим

чисельним методом інтегрування. Враховуючи, що визначається відношення площ, похибка методу чисельного інтегрування буде мати мінімальний вплив на результат оцінки.

Послідовність виконання роботи

1. Підготувати лабораторну установку до роботи.
2. Подати живлення на стенд.
3. Перевести ПКК в режим ручного керування. За допомогою кнопок редагування встановити хід регулюючого клапану на 45%.
4. Дочекатись закінчення перехідних процесів у ОК, спостерігаючи за зміною температури в печі.
5. Нанести збурення на ОК, змінивши положення регулюючого органу із 45% до 60%. Зняти розгінну характеристику за каналом регулювання. Дані першого експерименту $y_{i,1}^e$ занести в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Експериментальні дані

i	$t, \text{сек}$	$y_{i,1}^e, ^\circ\text{C}$	$y_{i,2}^e, ^\circ\text{C}$	$y_{i,3}^e, ^\circ\text{C}$	$y_{i,1}^3, ^\circ\text{C}$	$y_{i,2}^3, ^\circ\text{C}$	$y_{i,3}^3, ^\circ\text{C}$
0							
1							
2							
...							
n							

6. Зняти часові характеристики для інших робочих діапазонів ОК за п.3 – п.5, відповідно змінивши положення регулюючого органу з 60% до 75% та із 45% до 30%. Дані занести в табл. 4.1.
7. Повернути лабораторний стенд у вихідне положення.
8. Вимкнути установку та живлення.

Обробка результатів

1. Провести згладжування експериментальних даних $y_{i,j}^e$. Метод згладжування (ковзне усереднення (4.2), або експоненційне згладжування (4.4)) уточнити у викладача. Занести результати згладжування $y_{i,j}^3$ у табл. 4.1.
2. За даними табл. 4.1 побудувати графіки часових характеристик окремо для трьох експериментів. На кожному графіку зобразити експериментальну розгінну характеристику та згладжену. Зробити висновки, щодо якості згладжування.
3. Згладжені експериментальні дані $y_{i,j}^3$ перерахувати у нормовані $y_{i,j}^H$ за залежністю (4.5). Результати занести у табл. 4.2.

Таблиця. 4.2. Обробка результатів експерименту

i	$t, \text{сек}$	$y_{i,1}^H, ^\circ\text{C}$	$y_{i,2}^H, ^\circ\text{C}$	$y_{i,3}^H, ^\circ\text{C}$	$y_i^c, ^\circ\text{C}$	$h_i^{0.63}, ^\circ\text{C}$	$h_i^H, ^\circ\text{C}$
0							
1							
2							
...							
n							

4. Нормовані перехідні характеристики трьох експериментів $y_{i,j}^H$ усереднити за формулою (4.6). Результат y_i^c занести в табл. 4.2.
5. Усереднену перехідну характеристику апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку із запізненням, використавши обидва методи апроксимації, що описані в теоретичних відомостях. Для кожного методу апроксимації представити розрахунки та графіки пошуку параметрів передатної функції (4.7).

6. Для отриманих передатних функцій розрахувати перехідні процеси. Результати занести у табл. 4.2.
7. Оцінити адекватність наближених моделей за формулою (4.10). Для кожного методу апроксимації представити графічну оцінку адекватності за прикладом рис. 4.3. Зробити висновки, щодо якості апроксимації експериментальних даних.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити: теоретичні відомості; результати лабораторних експериментів занесені у табл. 4.1; три пари графіків розгінних та згладжених характеристик за результатами трьох експериментів; занесені у табл. 4.2 нормовані перехідні характеристики та усереднену перехідну характеристики; розрахунки апроксимації усередненої перехідної характеристики за двома методами із графіками пошуку параметрів передатної функції (4.7); графіки оцінки адекватності апроксимації експериментальних даних за двома методами; висновки.

Контрольні запитання до лабораторної роботи №4

1. Прокоментуйте хід виконання лабораторної роботи.
2. Які Ви знаєте методи визначення динамічних властивостей ОК?
3. Які Ви знаєте способи отримання експериментальних часових характеристик ОК? У якому випадку використовується той чи інший спосіб?
4. Які етапи експериментального визначення динамічних властивостей ОК?
5. З яких міркувань при дослідженні ОК експеримент проводять на різних режимах роботи обладнання?
6. Прокоментуйте етап попередньої підготовки для проведення експерименту.

7. Прокоментуйте етап дообладнання установки вимірювальними та регулювальними приладами. Яка роль стабілізуючих регуляторів, встановлених на вхідних та вихідних каналах ОК?
8. Прокоментуйте етап безпосередньої підготовки для проведення експерименту.
9. Прокоментуйте етап проведення експерименту. З яких міркувань визначається дискретність часу контролю вхідних та вихідних змінних?
10. Прокоментуйте етап обробки результатів експерименту.
11. Які причини виникнення промислових завад в АСК технологічними процесами? Методи усунення промислових завад на етапі обробки результатів експерименту.
12. Які недоліки методу ковзного усереднення розгінної характеристики?
13. При яких умовах результат згладжування експериментальних даних за методом експоненційного згладжування не буде відрізнятися від методу ковзного усереднення?
14. В якому випадку можна проводити усереднення нормованих розгінних характеристик ОК?
15. Які Ви знаєте методи апроксимації часових характеристик ОК?
16. Прокоментуйте апроксимацію перехідної характеристики ОК методом із використання співвідношення $2/3 y(t)$.
17. Прокоментуйте апроксимацію перехідної характеристики ОК модифікованим методом логарифмування.
18. Які динамічні елементи, що впливають на інерційність перехідних процесів містить електрична піч?
19. Яким чином проводиться оцінка адекватності наближеної математичної моделі ОК?

Лабораторна робота №5

Параметричне налаштування регулятора інженерними методами розрахунку

Мета роботи: практично закріпити знання параметричного налаштування регулятора інженерними методами розрахунку.

Теоретичні відомості

На сучасному етапі вимоги до функціонування систем керування зросли. АСК повинна забезпечувати необхідну якість регулювання, а також обмежувати зношування виконавчих пристроїв, мінімізувати витрату матеріальних та / або енергетичних ресурсів для досягнення цілей регулювання [21]. У практичній діяльності для налагодження систем регулювання, як правило, використовують наближені методи розрахунку параметрів регулятора. Такий підхід дозволяє в залежності від властивостей ОК провести параметричну оптимізацію регулятора за прийнятим критерієм керування без проведення складних попередніх досліджень.

Для наближеної оцінки динамічних властивостей ОК використовують спрощені математичні моделі у вигляді передаточних функцій (4.7) або (4.8). При цьому слід пам'ятати, якщо ОК є багатосмісним або має місце розподілення параметрів, то спрощені математичні моделі (4.7), (4.8) можуть бути використані як перше наближення для синтезу оптимальної АСК. Для такого випадку використовують математичну модель ОК у вигляді передатної функції 2-го порядку із запізненням [22 – 24].

Параметричне налаштування регулятора одноконтурної АСК зводиться до розрахунку його параметрів. У загальному випадку регулятор реалізує ПД-закон керування, для якого передатна функція має вигляд:

$$W_p(p) = Kp \left(1 + \frac{1}{T_{ip}} + Tdp \right); \quad (5.1)$$

де Kp – коефіцієнт передачі; Ti , Td – відповідно час інтегрування та диференціювання регулятора.

За останні 50 років отримано та використовується багато евристичних правил щодо налаштування параметрів промислових регуляторів. На кінець ХХ-го століття число інженерних методів налаштування регуляторів для одноконтурних АСК не перевищувало 200, станом на сьогодні – їх більше 1700 [23], що свідчить про актуальність даного напрямку досліджень.

При параметричній оптимізації регулятора інженерними методами часто користуються прямими показниками якості АСК. У табл. 5.1 представлені розрахункові залежності, які отримано із урахуванням експериментальних даних при автоматизації металургійних процесів [24].

Таблиця 5.1. Оптимальні значення параметрів налаштування регуляторів для ОК першого порядку із запізнюванням

Закон регулювання	Параметри налаштування	Бажаний перехідний процес			
		Аперіодичний		Із 20%-им перерегулюванням	
		Статичний ОК	Астатичний ОК	Статичний ОК	Астатичний ОК
ПІ	Kp	$\frac{0.6T_{OK}}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{0.4}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{0.7T_{OK}}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{0.7}{K_{OK}\tau_{OK}}$
	Ti	$0.6T_{OK}$	$6\tau_{OK}$	$0.7T_{OK}$	$3\tau_{OK}$
ПІД	Kp	$\frac{0.95T_{OK}}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{0.6}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{1.2T_{OK}}{K_{OK}\tau_{OK}}$	$\frac{1.1}{K_{OK}\tau_{OK}}$
	Ti	$2.4\tau_{OK}$	$5\tau_{OK}$	$2\tau_{OK}$	$2\tau_{OK}$
	Td	$0.4\tau_{OK}$	$0.2\tau_{OK}$	$0.4\tau_{OK}$	$0.4\tau_{OK}$

Широко використовуються формули, розроблені Всесоюзним теплотехнічним інститутом (ВТІ), які експериментально перевірені у системах регулювання із аналоговими електронними регуляторами [19]. Розрахункові залежності представлено у табл. 5.2. Як критерій

параметричної оптимізації у формулах ВТІ прийнята інтегральна квадратична оцінка якості із ступенем затухання перехідного процесу $\psi = 0.75$. Як видно із табл. 5.2, структура формул для розрахунку параметрів налаштування регулятора змінюється в залежності від значення відносного запізнювання τ_{OK} / T_{OK} . При налаштуванні аналогових електронних ПД-регуляторів значення постійної диференціювання Td вибирають таким чином, щоб виконувалося співвідношення: $Td / Ti = 0.15$. Даний взаємозв'язок не дозволяє розглядати Td , як самостійний параметр налаштування.

Таблиця 5.2. Оптимальні значення параметрів настройки регуляторів для ОК першого порядку із запізнюванням за рекомендацією ВТІ

Закон регулювання	Параметри налаштування	Відносне запізнювання ОК		
		$\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} < 0.2$	$0.2 < \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} < 1.5$	$\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} > 1.5$
ПІ	Kp	$\frac{1}{1.1 K_{OK} \tau_{OK}}$	$\frac{\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} + 0.6}{2.6 K_{об} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} - 0.08 \right)}$	$\frac{1}{2 K_{OK}}$
	Ti	$3.3 \tau_{OK}$	$\frac{0.8 T_{OK}}{\tau_{OK}}$	$0.6 \tau_{OK}$
ПІД	Kp	$\frac{1}{0.8 K_{OK} \tau_{OK}}$	$\frac{\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} + 1.5}{3.7 K_{OK} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} - 0.13 \right)}$	$\frac{1}{1.7 K_{OK}}$
	Ti	$2.5 \tau_{OK}$	T_{OK}	$0.7 \tau_{OK}$
	Td^*	$0.15 T_I$	$0.15 T_I$	$0.15 T_I$

Примітка: Td^* - рекомендації відносяться до регуляторів із значною схематичною залежністю між Ti та Td .

Найбільше розповсюдження при параметричній оптимізації регулятора інженерними методами отримали інтегральні критерії якості:

$$ISE = \int e^2(t)dt \rightarrow \min ; \quad (5.2)$$

$$IAE = \int |e(t)|dt \rightarrow \min ; \quad (5.3)$$

де $e(t)$ – розбаланс АСК. Інтегрально-квадратичний критерій ISE широко використовується в задачах оптимального керування внаслідок можливості аналітичного пошуку рішення. Інтегрально-модульний критерій IAE , як правило, застосовується при чисельній оптимізації динамічних систем.

У табл. 5.3 та табл. 5.4 зведено функціональні залежності для параметричної оптимізації регулятора за критеріями (5.2) та (5.3) відповідно [21, 23].

Таблиця 5.3. Параметрична оптимізація регулятора за критерієм ISE

Закон регулювання	Параметри налаштування	Формули для розрахунку		
		(5.4) [13]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 1.0$	(5.5) [13]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 1.0$	(5.6) [11]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 2.0$
ПІ	K_p	$\frac{1.279}{K_{OK}} \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.945}$	$1.305 \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.959}$	$\frac{1}{K_{OK}} \left(0.567 + 0.531 \frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)$
	T_i	$\frac{T_{OK}}{0.535} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.586}$	$\frac{T_{OK}}{0.492} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.739}$	$1.298 T_{OK} + 0.544 \tau_{OK}$
ПІД	K_p	$\frac{1.473}{K_{OK}} \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.97}$	$\frac{1.495}{K_{OK}} \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.945}$	$\frac{1}{K_{OK}} \left(0.655 + 0.492 \frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)$
	T_i	$\frac{T_{OK}}{1.115} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.753}$	$\frac{T_{OK}}{1.101} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.771}$	$0.669 T_{OK} + 0.469 \tau_{OK}$
	T_d	$0.55 T_{OK} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.948}$	$0.56 T_{OK} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{1.006}$	$0.076 T_{OK} + 0.387 \tau_{OK}$

Таблиця 5.4. Параметрична оптимізація регулятора за критерієм IAE

Закон регулювання	Параметри налаштування	Формули для розрахунку		
		(5.7) [13]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 1.0$	(5.8) [13]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 0.5$	(5.9) [11]; $0.1 \leq \frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \leq 2.0$
ПІ	K_p	$\frac{0.984}{K_{OK}} \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.986}$	$\frac{T_{OK}}{K_{OK} \tau_{OK}}$	$\frac{1}{K_{OK}} \left(0.41 + 0.398 \frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)$
	T_i	$\frac{T_{OK}}{0.608} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.707}$	T_{OK}	$0.887 T_{OK} + 0.483 \tau_{OK}$
ПІД	K_p	$\frac{1.435}{K_{OK}} \left(\frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)^{0.921}$	$1.4 \frac{T_{OK}}{K_{OK} \tau_{OK}}$	$\frac{1}{K_{OK}} \left(0.621 + 0.478 \frac{T_{OK}}{\tau_{OK}} \right)$
	T_i	$\frac{T_{OK}}{0.878} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{0.749}$	$1.3 \tau_{OK}$	$0.901 T_{OK} + 0.388 \tau_{OK}$
	T_d	$0.482 T_{OK} \left(\frac{\tau_{OK}}{T_{OK}} \right)^{1.137}$	$0.5 \tau_{OK}$	$0.029 T_{OK} + 0.34 \tau_{OK}$

Розглянуті розрахункові залежності з табл. 5.1 – 5.4 справедливі для аналогових систем керування. У випадку налаштування цифрових АСК необхідно враховувати дискретну роботу регулятора. З теорії систем цифрового керування відомо, що період квантування T_{kv} вносить запізнювання в роботу системи керування, яке рівне $T_{kv}/2$ [14].

Фіксацію вихідного сигналу ЦР на період квантування T_{kv} виконує фіксатор нульового порядку (ФНП), передатна функція якого

$$W_{\text{ФНП}}(p) = \frac{1 - e^{-pT_{kv}}}{p} = \left| p = j\omega \right| = \frac{1 - e^{-j\omega T_{kv}}}{j\omega} = T_{kv} \frac{\sin\left(\frac{\omega T_{kv}}{2}\right)}{\frac{\omega T_{kv}}{2}} e^{-j\frac{\omega T_{kv}}{2}}. \quad (5.10)$$

Із останнього співвідношення випливає, що ФНП вносить запізнення у цифрову АСК, яке дорівнює $T_{kv}/2$.

Динамічні властивості ФНП можна розглядати як частину динамічних властивостей ОК. Тоді передатну функцію ОК можна представити у вигляді еквівалентної передатної функції ОК $W_{\text{ЕОК}}(p) = W_{\text{ОК}}(p) W_{\text{ФНП}}(p)$, а

регулятор розраховувати за запропонованими залежностями. Проте, для такого випадку, добуток $W_{OK}(p)W_{ФНП}(p)$ неможливо буде подати спрощеною моделлю ОК у вигляді аперіодичної ланки першого із запізненням.

Щоб представити динамічні властивості еквівалентного ОК спрощеною моделлю ОК (у вигляді аперіодичної ланки першого або другого порядку із запізненням) та розрахувати оптимальні налаштування цифрової АСК за розглянутими формулами достатньо:

- 1) задатися періодом квантування ЦР Tkv ;
- 2) визначити еквівалентне запізнювання ОК в цифрові АСК як суму:

$$\tau_e = \tau + \frac{Tkv}{2}, \text{ де } \tau - \text{запізнювання ОК за (4.7);}$$

- 3) для параметричної оптимізації ЦР за інженерними залежностями необхідно використовувати передатну функцію еквівалентного ОК із врахуванням еквівалентного запізнювання τ_e .

Послідовність виконання роботи

Попередня підготовка

1. Вхідними даними для параметричної оптимізації регулятора АСК є наближена математична модель ОК (4.7), яку отримано в результаті апроксимації методами з використанням співвідношення $2/3y(t) - W_{OK}^1(p)$ та модифікованим методом логарифмування – $W_{OK}^2(p)$, див. лабораторну роботу №4.
2. Розрахувати параметри налаштування, ПІ– та ПІД–регуляторів за критерієм ISE або IAE для $W_{OK}^1(p)$, $W_{OK}^2(p)$. Лабораторні бригади №1, №3 та №5 оптимізують налаштування регулятора за критерієм ISE , табл. 5.3, залежності (5.4)–(5.6). Лабораторні бригади №2, №4 та №6 проводять

параметричну оптимізацію регулятора за критерієм IAE , табл. 5.4, залежності (5.7) – (5.9). Результати розрахунків занести у табл. 5.5.

- Провести імітаційне моделювання АСК в середовищі Simulink MatLab із параметрами регулятора (табл. 5.5) для моделей ОК $W_{OK}^1(p)$, $W_{OK}^2(p)$. Для отриманих перехідних процесів визначити інтегральні показники якості за якими проводився синтез АСК (ISE або IAE).

Таблиця 5.5. Параметри розрахунку налаштувань регулятора

Модель ОК		$W_{OK}^1(p)$					$W_{OK}^2(p)$				
Тип і параметри регулятора		ПІ		ПІД			ПІ		ПІД		
		K_p	T_i	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	K_p	T_i	T_d
Розрахункові формули	(5.4)/(5.7)										
	(5.5)/(5.8)										
	(5.6)/(5.9)										

- Результати моделювання представити у вигляді графіків перехідних процесів АСК. Для наочності аналізу результатів моделювання сформувати 4 групи графіків перехідних процесів. Кожне сімейство перехідних процесів формується за типом регулятора та моделлю ОК (містить графіки 3 перехідних процесів АСК з налаштуваннями регулятора за формулами (5.4) – (5.6) або (5.7) – (5.9)).
- На основі аналізу інтегрального критерію якості (ISE або IAE) зробити висновки щодо якості перехідних процесів у АСК, де параметрична оптимізація регулятора проводилась за залежностями (5.4) – (5.6) або (5.7) – (5.9).

Виконання лабораторної роботи

1. Для проведення досліду на лабораторному стенді узгодити з викладачем оптимальні налаштування ПІ– та ПІД–регулятора за табл. 5.5.
2. Підготувати лабораторну установку до роботи.
3. За завданням викладача із табл. 5.5 ввести параметри налаштування ПІ–регулятора у ПКК S7386–50D.
4. Дочекатися закінчення перехідних процесів у системі керування, слідкуючи за зміною температури в печі.
5. Нанести збурення на систему за каналом регулювання. Зняти розгінну характеристику АСК за каналом регулювання. Дані занести до табл.5.6.

Таблиця 5.6. Розгінна характеристика АСК з ПІ – регулятором.

t, c										
$y^e(t), ^\circ C$										
$y^3(t), ^\circ C$										
$y^H(t), ^\circ C$										

6. За завданням викладача з табл.5.5 ввести параметри налаштування ПІД–регулятора у ПКК S7386–50D.
7. Дочекатися закінчення перехідних процесів у системі керування.
8. Нанести збурення на АСК за каналом регулювання. Зняти розгінну характеристику АСК. Дані занести до табл. 5.7.

Таблиця 5.7. Розгінна характеристика АСК з ПІД – регулятором.

t, c										
$y^e(t), ^\circ C$										
$y^3(t), ^\circ C$										
$y^H(t), ^\circ C$										

9. Повернути лабораторний стенд у вихідне положення. Вимкнути живлення стенду. Засвідчити результати експерименту у викладача.

Обробка результатів

1. За даними табл. 5.6 та табл. 5.7 побудувати графіки розгінних характеристик в системі керування за каналом регулювання.
2. Провести згладжування експериментальних даних $y^e(t)$ за залежністю (4.4). Результати занести у табл. 5.6 та табл. 5.7.
3. Згладжені експериментальні дані $y^3(t)$ перерахувати у нормовані $y^H(t)$ за залежністю (4.5). Результати занести у табл. 5.6 та табл. 5.7. Визначити інтегральні показники якості перехідних процесів АСК.
4. Порівняти експериментально отримані перехідні характеристики у АСК із результатами імітаційного моделювання середовища Simulink MatLab. За залежністю (4.10) оцінити відносну похибку між експериментальними результатами та аналітичним моделюванням. Зробити висновки, щодо отриманих результатів.

Оформлення звіту

Звіт повинен містити: теоретичні відомості; розрахунки налаштування регуляторів за табл. 5.3 або 5.4 (в залежності від номера бригади); зведену табл. 5.5 параметрів налаштування регулятора; 4 групи перехідних процесів у АСК, змодельованих у Simulink MatLab, із числовими значеннями критерію якості ISE або IAE ; експериментальні та перераховані значення розгінних характеристик АСК у табл. 5.6 та табл. 5.7; експериментальні та аналітичні перехідні процеси АСК із ПІ– та ПІД–регуляторами з відотною оцінкою розбіжності результатів; висновки.

Контрольні запитання до лабораторної роботи №5

1. Прокоментуйте хід виконання лабораторної роботи.
2. Які розрахунки необхідно представити у звіті лабораторної роботи?

3. Назвіть способи досягнення нульових початкових умов для системи регулювання температури у печі. Який із способів швидший, чому?
4. Які закони керування використовуються для регуляторів одноконтурних АСК?
5. Які Ви можете запропонувати рекомендації для вибору закону регулювання АСК в залежності від властивостей ОК?
6. Порівняйте недоліки і переваги між П– та ПІ–регуляторами.
7. Порівняйте недоліки і переваги між ПІ– та ПІД–регуляторами.
8. В яких технічних реалізаціях ПІД–регуляторів присутній взаємозв'язок між інтегральною та диференціальною частинами регулятора, чому?
9. Які Ви знаєте методи налаштування регуляторів для одноконтурних АСК?
10. Які переваги та недоліки інженерних методів налаштування регуляторів АСК?
11. Яка вхідна інформація використовується для інженерних методів розрахунку налаштування регуляторів одноконтурних АСК?
12. За якими критеріями проводять налаштування АСК?
13. Із яких міркувань визначають критерій якості налаштування АСК?
14. Які Ви знаєте прямі показники якості АСК?
15. Перечисліть непрямі показники якості АСК.
16. Яке значення може приймати коефіцієнт підсилення одноконтурної АСК за каналом регулювання та збурення? Відповідь обґрунтуйте.
17. Як впливає параметр K_p регулятора на перехідний процес у АСК?
18. Як впливає параметр T_i регулятора на перехідний процес у АСК?
19. Як впливає параметр T_d регулятора на перехідний процес у АСК?
20. Які елементи цифрової АСК впливають на загальну інерційність регулюючого каналу ОК? Відповідь обґрунтуйте.

Література

1. Модули преобразования сигналов интерфейсов. Руководство по эксплуатации / – К.: Конис ЛАБ, 2009. – 17 с., http://conislab.net/ru/manual_ru.html.
2. Модули дискретного ввода-вывода. Руководство по эксплуатации / – К.: Конис ЛАБ, 2009. – 52 с., http://conislab.net/ru/manual_ru.html.
3. Модули аналогового ввода-вывода. Руководство по эксплуатации / – К.: Конис ЛАБ, 2009. – 77 с., http://conislab.net/ru/manual_ru.html.
4. Модули управления. Руководство по эксплуатации. / – К.: Конис ЛАБ, 2009. – 33 с., http://conislab.net/ru/manual_ru.html.
5. Электроприводы воздушных заслонок / – К.: БЕЛИМО Украина, 2010, № 12. – 32 с., <http://www.belimo.com.ua>.
6. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с., ил.
7. Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС / Благоев Э. Е., Ивницкий Б. Я.; – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288с.
8. Исполнительные устройства промышленных регуляторов / Емельянов А. И., Емельянов В. А.; – М.: Машиностроение, 1975. – 224с.
9. Электромагнитные приводы исполнительных механизмов / Шучинский С. Х.; – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
10. Product Information MP/LONWORKS® UK24LON Gateway / BELIMO, – 11p., <http://www.belimo.com.ua>.
11. Ковриго Ю. М. Технічні засоби автоматизації технологічних процесів. Аналогові апаратні засоби. Навч. посіб. / – К.: НТУУ “КПІ”, 2006. – 164с.
12. Рыбалев А.Н., Разработка и исследование алгоритмов и программ управления исполнительными механизмами систем автоматического

- регулювання. / А.Н. Рыбалев, Д.А. Теличенко, В.Ю. Косицин и др.// Вестник АМГУ. Выпуск №57. – с. 104 -110.
13. Контроллер регулирующий микропроцессорный Ремиконт Р –110; Р –112; Р – 122. Техническое описание. 2Яа.399.540.Т01. – 176с.
 14. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій: Підручник / В. Д. Романенко. –К.: Вища школа, 1995. – 519с.
 15. Остапенко Ю.А., Экспериментальные методы исследования объектов управления химических производств. Учеб. пособие. / Ю. А. Остапенко, М.З. Кваско, В.М. Ковалевський. – К.: КПИ, 1981. –111с.
 16. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю.О. Остапенко. –К.: Задруга, 1999. –424с., іл..
 17. Жученко А.І. Ідентифікація динамічних характеристик./А.І. Жученко, М.З. Кваско, Н.А. Кубрак. Комп'ютерні методи. К.: КЛТКМ, 2000. – 182с., іл..
 18. Кубрак А.І. Ідентифікація динамічних характеристик елементів систем керування. Ч.1. Математичні методи: Навч. посіб. / А.І. Кубрак. К.: ІСДО, 1995. 208с.
 19. Ключев А. С. Наладка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. Справочное пособие / А.С. Ключев и др. М.: Энергия, 1977. –400с., с ил..
 20. Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу "Автоматизація технологічних процесів галузі" для студентів спеціальності "Автоматизація технологічних процесів та виробництв" / Укл. В.О. Самсонов, В.П. Бунь. -К.: КПІ, 1992. -24 с. -Рос. новою.
 21. Голинко И.М. Экспресс-метод оптимальной настройки аналогового регулятора по интегральным критериям качества / И.М. Голинко, Ю.М. Ковриго, А.И. Кубрак // Теплоэнергетика. –2014, № 3. –С. 15–22.

22. Голинко И.М. Оптимальная настройка системы управления для объекта второго порядка с запаздыванием / И.М. Голинко // Теплоэнергетика. – 2014, № 7. –С. 63–71.
23. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules [Text]: 3rd Edition / Aidan O'Dwyer. –London: Imperial College Press, 2009. –608pp.
24. Дубровный В.А. Наладка автоматических устройств контроля и регулирования. Ч.2. Справочное пособие. / В.А. Дубровный, Е.И. Забокрицкий, В.Г. Трегуб, Б.А. Холодовский. –К.: Наукова думка, 1981. – 866с.